

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA: TRABAJO FIN DE GRADO

**“DESARROLLO DE UN SENSOR PARA LA DETERMINACIÓN
DE LA HUMEDAD DEL AISLAMIENTO SÓLIDO DE UN
TRANSFORMADOR EN ACEITE VEGETAL”**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

AUTOR: JORGE ROVIRA BONILLA

TUTORES: BELÉN GARCÍA DE BURGOS, GUILLERMO ROBLES MUÑOZ

Marzo 2014

ÍNDICE

Índice de figuras	6
Índice de tablas	8
1. Introducción	9
2. Aislamiento de un transformador	12
2.1 Concepto de aislamiento y materiales empleados	12
2.1.1 El papel Kraft	13
2.1.2 El aceite	14
2.1.2.1 El aceite vegetal	16
2.2 Humedad en el aislamiento	16
2.2.1 Método Karl Fischer	17
2.3 Espectroscopia dieléctrica	18
2.3.1 Método FDS	19
2.3.2 Capacidad, pérdidas dieléctricas y tangente de delta	19
2.3.3 Respuesta dieléctrica en aceite vegetal	20
2.3.4 IDA 200	21
3. Procedimiento experimental	23
3.1 Diseño del objeto de ensayo	23
3.2 Preparación de las muestras	25
3.3 Protocolo de medida	26
4. Resultados obtenidos	29
4.1 Medidas directas de humedad sobre las muestras	29
4.2 Medidas dieléctricas	31
4.2.1 Capacidad	31
4.2.2 Pérdidas dieléctricas	32

4.2.3 Tangente de delta	34
4.3 Tendencia de las humedades a una frecuencia determinada	36
4.3.1 Capacidad	36
4.3.2 Pérdidas dieléctricas	37
4.3.3 Tangente de delta	38
4.4 Ecuación matemática de las curvas de las pérdidas dieléctricas	39
5. Comparación de las medidas obtenidas en papel impregnado con aceite vegetal con las obtenidas en papel impregnado en aceite mineral	46
5.1 Comparación de las propiedades del aceite vegetal y mineral	46
5.2 Medidas obtenidas en aceite mineral	47
5.2.1 Capacidad	48
5.2.2 Pérdidas dieléctricas	51
5.2.2.1 Ecuación de las curvas de pérdidas dieléctricas	52
5.2.3 Tangente de delta	57
6. Conclusiones	60
7. Anexo: presupuesto del proyecto	61
8. Bibliografía	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: A la izquierda se muestra la estructura molecular de la glucosa. A la derecha, la estructura molecular de la celulosa. Tomada de [4]	13
Figura 2.2: Equipo Karl Fischer	18
Figura 2.3: Circuito equivalente de un condensador real y su diagrama de fasores. Tomado de [9]	20
Figura 2.4: IDA 200 empleado en este estudio. Tomado de [12]	21
Figura 3.1: Dimensiones del objeto de ensayo. Tomado de [13]	23
Figura 3.2: Objeto de ensayo. Tomada de [13]	24
Figura 3.3: Cuba con un objeto de ensayo en su interior	25
Figura 3.4: Máquina de bobinado para los objetos de ensayo	26
Figura 3.5: Esquema de medición empleado en las medidas FDS. Tomado de [14]	28
Figura 4.1: Gráfica con los resultados de la capacidad en el aceite vegetal	31
Figura 4.2: Gráfica con los resultados de las pérdidas dieléctricas en el aceite vegetal	33
Figura 4.3: Gráfica con los resultados de las pérdidas dieléctricas en el aceite vegetal. Zona de baja frecuencia	34
Figura 4.4: Gráfica con los resultados de la tangente de delta en el aceite vegetal	34
Figura 4.5: Gráfica con los resultados de la tangente de delta en el aceite vegetal. Zona del cambio de pendiente	35
Figura 4.6: Gráfica de las tendencias de la capacidad a las frecuencias determinadas	37
Figura 4.7: Gráfica de las curvas de tendencia de las pérdidas dieléctricas a las frecuencias determinadas	38
Figura 4.8: Gráfica de las curvas de tendencia de la tangente de delta a las frecuencias determinadas	39
Figura 4.9: Pérdidas dieléctricas en el aceite vegetal. Curvas a caracterizar con su ecuación matemática	40
Figura 4.10: Curva de 1,20% de humedad. Recta ajustada	41

Figura 4.11: Curva de 2,13% de humedad. Recta ajustada	42
Figura 4.12: Curva de 3,26% de humedad. Recta ajustada	43
Figura 4.13: Curva de 4,11% de humedad. Recta ajustada	44
Figura 4.14: Gráfica de $h(H\%)$	45
Figura 5.1: Gráfica con los resultados de la capacidad en el aceite vegetal	49
Figura 5.2: Gráfica con las curvas de la capacidad en aceite mineral. Tomada de [14]	49
Figura 5.3: Gráfica con los resultados de la capacidad en aceite vegetal y mineral. Curvas de 1% y 4% de humedad	50
Figura 5.4: Gráfica con los resultados de las pérdidas dieléctricas en el aceite vegetal	51
Figura 5.5: Gráfica con los resultados de las pérdidas dieléctricas en el aceite mineral. Tomada de [14]	51
Figura 5.6: Gráfica con los resultados de las pérdidas dieléctricas en aceite vegetal y mineral. Curvas de 1% y 4% de humedad	52
Figura 5.7: Pérdidas dieléctricas en el aceite vegetal. Curvas a caracterizar con su ecuación matemática	53
Figura 5.8: Curva de 1,31% de humedad para aceite mineral. Recta ajustada	53
Figura 5.9: Curva de 2,30% de humedad para aceite mineral. Recta ajustada	54
Figura 5.10: Curva de 3,40% de humedad para aceite mineral. Recta ajustada	55
Figura 5.11: Curva de 4,40% de humedad para aceite mineral. Recta ajustada	56
Figura 5.12: Gráfica de $h(H\%)$. Aceite mineral	57
Figura 5.13: Gráfica con los resultados de la tangente de delta en el aceite vegetal	58
Figura 5.14: Gráfica con los resultados de la tangente de delta en el aceite mineral. Tomada de [14]	58
Figura 5.15: Gráfica con los resultados de la tangente de delta en aceite vegetal y mineral. Curvas de 1% y 4% de humedad	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Humedad de las muestras y el aceite vegetal	30
Tabla 5.1: Características de los aceites. Tomada de [15] y [16]	46
Tabla 5.2: Humedad de las muestras y el aceite mineral. Tomada de [14]	48
Tabla 7.1: Presupuesto del proyecto	61
Tabla 7.2: Tiempo empleado en el proyecto	61

1. INTRODUCCIÓN.

Un transformador es una máquina eléctrica cuya misión fundamental es elevar o reducir el nivel de tensión. Aplicado a un sistema eléctrico real, es una máquina que transvasa energía eléctrica entre dos subsistemas con distinto nivel de tensión. Debido a que la electricidad se transporta a altas tensiones para minimizar las pérdidas, los transformadores de potencia constituyen un elemento primordial dentro del sistema eléctrico, ya que se encargan de conectar los subsistemas que están a niveles de tensión distintos. Los transformadores solo funcionan con corriente alterna porque su principio básico de funcionamiento se basa en el flujo magnético creado por una fuente de tensión variable.

Dada su importancia, resulta fundamental prever cuando puede fallar un transformador para anticiparse y así evitar la pérdida momentánea del servicio eléctrico. Una buena predicción del fallo hace que la compañía eléctrica pueda tener un transformador de repuesto y de paso evitar las sanciones producidas por la interrupción del suministro. Para tener un transformador de repuesto a tiempo hay que tener en cuenta que, además de tener un alto coste, se construyen a medida y por encargo.

Para evitar los fallos en su funcionamiento un transformador debe estar correctamente aislado. El nivel de aislamiento variará según la tensión asignada del transformador, ya que un aislamiento excesivo no es rentable. Los transformadores de

potencia tienen generalmente tensiones nominales superiores a 20 kV y para estos casos se utiliza papel Kraft impregnado en aceite para cubrir los hilos o pletinas de cobre que forman los bobinados del transformador [1]. A su vez, tanto los bobinados como el núcleo magnético se encuentran sumergidos en aceite en una cuba.

Los materiales aislantes se deterioran de manera muy grave cuando se produce un fallo, debido a las altas corrientes que circulan y elevan mucho la temperatura. Por este motivo, las máquinas eléctricas deben tener protecciones frente a los distintos fallos que se puedan producir.

Durante el funcionamiento normal de un transformador, las principales causas de deterioro de un aislamiento son la temperatura y la humedad. Una temperatura de funcionamiento elevada provoca que las cadenas de celulosa del papel Kraft se rompan liberando agua, que a su vez provoca una disminución de la rigidez dieléctrica del aislamiento. La humedad también puede penetrar en el aceite si se encuentra en contacto con el aire del ambiente. La presencia de humedad en un aislamiento provoca pequeñas rupturas dieléctricas que aceleran su envejecimiento. Por tanto, un aspecto básico para una buena estimación del estado de un transformador es calcular el contenido de humedad en las distintas partes del aislamiento. De este modo se puede minimizar la posibilidad de que un transformador falle de una forma imprevista y así evitar sus dañinas consecuencias.

El objetivo de esta investigación es calibrar un sensor que calcule el nivel de humedad existente en el aislamiento sólido de un transformador en servicio. Para ello, se analizan los valores de la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta frente a la humedad a lo largo del tiempo. El principio empleado es el método FDS que se aplica a una muestra que se encuentra en el interior del transformador y en las mismas condiciones de funcionamiento que los bobinados. De esta manera la muestra es representativa de la situación en la que se encuentra el aislamiento sólido del transformador.

El sensor está formado por un núcleo de aluminio en el que se encuentra enrollado el papel impregnado en aceite. El proceso experimental del proyecto consistió en realizar medidas sobre distintos objetos de ensayo con distintos porcentajes de humedad. Los objetos de ensayo se encontraban sumergidos en aceite vegetal dentro de una cuba de teflón. Al obtener las características de las distintas muestras se consiguen unos datos representativos de la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta para cada nivel de humedad. De este modo el sensor puede conocer el estado del papel al comparar los datos obtenidos en el transformador real con los datos representativos.

La caracterización del sensor se divide en dos Trabajos Fin de Grado. El primero fue realizado por Daniel Santiago Sanz, y en él se obtuvieron las curvas de respuesta dieléctrica usando el aceite mineral Nytro Taurus de Nynas como aislamiento líquido. En el presente trabajo se ha caracterizado el sensor en presencia del ester natural BIOTEMP, comercializado por ABB para ser usado en transformadores. Se debe señalar que los experimentos correspondientes a ambos TFG se han realizado simultáneamente y que todas las medidas se han hecho de manera conjunta.

2. AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR.

En este capítulo se explicará qué es un aislamiento. Se detallarán los materiales que componen el aislamiento de un transformador, sus principales causas de deterioro y los métodos actuales de medida para detectar fallos en cada tipo de aislamiento.

2.1 Concepto de aislamiento y materiales empleados.

El aislamiento compone la parte más cara e importante de un transformador. Para su correcto funcionamiento, las partes que se encuentran a distinto potencial se deben encontrar debidamente aisladas para evitar cortocircuitos y fallos internos. Por esto, es necesario poder evaluar de forma periódica el estado de los distintos aislamientos que se encuentran en estas máquinas [1].

Los aislantes o dieléctricos son materiales que se oponen a la circulación de la corriente eléctrica por su interior, es decir, tienen una conductividad muy baja.

Un material aislante puede aguantar los esfuerzos producidos por un campo eléctrico de magnitud elevada, sin embargo, si se aumenta de manera progresiva el campo eléctrico llegará un instante determinado en el que se empezará a producir un arranque de electrones de los átomos del dieléctrico. En este momento se produce un arco eléctrico y se inicia la circulación de corriente a través del aislante. El valor del campo eléctrico (medido normalmente en kV/mm) para el cual se inicia la ruptura dieléctrica se denomina rigidez dieléctrica y es la característica más importante de un material aislante [2].

Los materiales dieléctricos, como cualquier elemento aplicado en el área de la ingeniería, están en constante investigación y sufriendo modificaciones que mejoran sus propiedades físicas para ser más efectivos en sus funciones y evitar algunos problemas que puedan ocasionar los materiales antiguos como puede ser la contaminación.

A continuación se explicarán los materiales más importantes que forman el aislamiento de un transformador.

2.1.1 El papel Kraft.

Para el aislamiento de las espiras en transformadores de potencia de tensión nominal mayor de 20 kV se usa el papel impregnado en aceite. El papel recubre los hilos de cobre de los arrollamientos para evitar cortocircuitos entre espiras. A su vez, divide los espacios de aceite para soportar mayores esfuerzos eléctricos y aportar rigidez mecánica para contrarrestar los esfuerzos magnéticos en caso de cortocircuito [3]. Para tensiones nominales menores basta con aplicar un esmalte especial para aislar correctamente las espiras y evitar cortocircuitos.

El papel constituye la parte sólida del aislamiento de un transformador y el tipo empleado en este estudio es el papel Kraft. El papel Kraft está formado por pulpa de madera, cuyo componente principal es la celulosa (75-80%). También contiene en cantidades significativamente menores hemicelulosa (10-20%), lignina (2-6%) y compuestos inorgánicos (<0,5%) [3]. A este material se le aplica el método Kraft para mejorar sus propiedades dieléctricas y térmicas. El papel resultante es poroso, hecho que sería perjudicial ya que se podría almacenar aire y humedad en estos poros. Esto no sucede gracias a que se impregna en aceite para mejorar las propiedades dieléctricas del material final.

La celulosa es un polímero, es decir, una cadena de monómeros de glucosa. A continuación se muestra su estructura molecular:

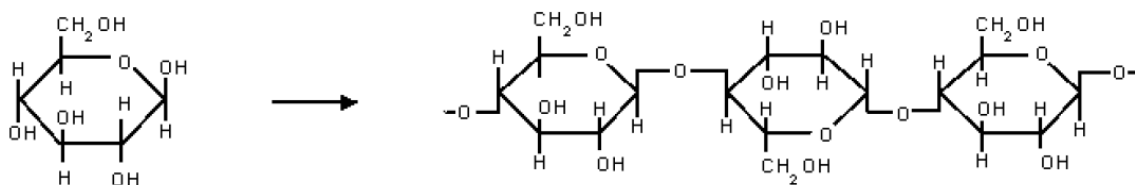


Figura 2.1: A la izquierda se muestra la estructura molecular de la glucosa. A la derecha, la estructura molecular de la celulosa. Tomada de [4].

El número de monómeros de la cadena de celulosa determina el grado de polimerización del papel y cuanto mayor sea este valor mejor será la calidad del papel, se encontrará en mejores condiciones de aislar y de aguantar esfuerzos mecánicos. Un papel nuevo debe tener una longitud de cadena aproximada de 800 monómeros y, cuando es inferior a 200 monómeros, el papel corre serio riesgo de romperse en caso de cortocircuito [1].

Como cualquier material aislante, su principal mecanismo de envejecimiento es la temperatura y la existencia de humedad. A elevadas temperaturas, las cadenas de celulosa se rompen en cadenas más pequeñas en una reacción llamada hidrólisis. La hidrólisis produce agua (H_2O), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e hidrógeno (H_2) en menores proporciones y otros compuestos llamados furanos. En el caso concreto del papel, la existencia de humedad en el aceite es un grave problema debido a su tendencia a absorber la humedad del ambiente, es decir, es un material altamente higroscópico. Por esto hay que mantenerlo aislado del exterior, ya que la humedad es un elemento muy nocivo para la integridad de los aislantes.

De este modo podemos concluir que un papel con un alto contenido de humedad indica un envejecimiento mayor y una resistencia dieléctrica y mecánica menor.

2.1.2 El aceite.

Actualmente el aceite más usado es el aceite mineral, debido a que el aceite vegetal está aún en fase experimental y de desarrollo. En nuestro estudio el aceite empleado es el aceite vegetal BIOTEMP, desarrollado y comercializado por ABB. En cualquier caso, el aceite es un aislante indispensable para aislar los transformadores de altas potencias.

El aceite es un aislante muy efectivo gracias a su elevada rigidez dieléctrica y a una permitividad muy baja, que absorbe el campo eléctrico en su seno reduciendo su impacto en el aislamiento sólido. Esto es muy útil en caso de producirse una ruptura dieléctrica debido a que el aceite, como aislamiento líquido, tiene la gran ventaja de regenerarse después de producirse una perforación eléctrica. Las partículas carbonizadas se depositan en el fondo de la cuba y el aislamiento se renueva en la zona en la que se ha producido la descarga parcial. Este hecho es una gran ventaja que no tienen los aislamientos sólidos.

El aceite también cumple una función muy importante: refrigerar el transformador. Es un buen refrigerante porque tiene una viscosidad reducida, que favorece el movimiento del aceite, y una gran constante de transmisión de calor por conducción. También tiene un gran calor específico, característica importante para evitar que suba muy rápido la temperatura del transformador en caso de sobrecarga o cortocircuito.

Como principal inconveniente, el aceite vegetal tiene un punto de inflamación bajo que puede llegar a suponer un serio riesgo de incendio en caso de fallo.

Además de todo esto, una muestra de aceite del interior del transformador también sirve para obtener un análisis de los compuestos disueltos en el aceite y analizar su respuesta dieléctrica, que indica el estado del aislamiento del transformador. Esto es útil debido a que no se puede acceder al papel que cubre los arrollamientos para tomar una muestra y estudiar su estado.

El principal mecanismo de envejecimiento del aceite es la oxidación. Se produce por efecto de la temperatura al entrar en contacto el aceite con el oxígeno, ya sea al estar expuesto al ambiente exterior o con la humedad existente dentro de la cuba. En la reacción de oxidación se produce agua. En el caso del aceite vegetal, la oxidación por estar expuesto al ambiente es más grave debido a que estos aceites absorben más humedad del exterior que los aceites minerales.

Otros factores que afectan la calidad del aceite como aislante son las pequeñas rupturas dieléctricas que producen partículas quemadas, la luz y los ácidos y lodos que se generan durante el funcionamiento del transformador [1].

Los lodos son partículas sólidas que se generan principalmente cuando se produce una ruptura dieléctrica. La peor consecuencia que tienen es que dificultan la refrigeración del aceite debido a dos motivos: se incrustan en los arrollamientos impidiendo que evacúen el calor y entorpecen la circulación del aceite por el interior de la cuba, produciendo un aumento de la temperatura y un envejecimiento más rápido [2].

Los ácidos son compuestos polares solubles en el aceite que afectan directamente a las propiedades físicas y químicas del aceite, deteriorando sus propiedades eléctricas. Disminuyen la rigidez dieléctrica y evacua peor el calor [2].

En general, los materiales aislantes sólidos contienen una cantidad de agua mayor, pudiendo llegar a ser de unas 200 veces superior a la cantidad de agua existente en el aceite, debido a que el papel tiene una más tendencia a absorber la humedad que el aceite. La humedad se transfiere entre el papel y el aceite por variaciones en la temperatura, producidas por ejemplo, por variaciones de carga del transformador. Cuando la temperatura aumenta se transfiere humedad del papel al aceite y si la temperatura desciende el proceso es el contrario.

En el capítulo 5 de este documento se explica con más detalle las características del aceite vegetal elegido para este proyecto y sus ventajas y desventajas frente al aceite mineral.

2.1.2.1 El aceite vegetal.

El aceite vegetal es una alternativa moderna al uso de aceites minerales. El objetivo de los fabricantes de aceites vegetales es conseguir un fluido con las garantías que tiene el aceite mineral como aislante a la vez que se suprimen sus desventajas más problemáticas.

El aceite vegetal es un ester que proviene de las semillas de distintos vegetales. En el caso del BIOTEMP los vegetales empleados son la soja, canola y girasol. Debido a su origen, estos aceites no producen la contaminación del medio en caso de vertido o de fugas de gases producidos por arcos eléctricos en el interior de la cuba durante el funcionamiento del transformador.

Dentro de sus propiedades como aislante la que más destaca por encima de los aceites minerales es su elevado punto de inflamación ($> 350\text{ }^{\circ}\text{C}$) que reduce de manera considerable el riesgo de incendio en transformadores con este tipo de aceites.

La gran desventaja del aceite vegetal es su alta viscosidad que provoca que evacúe mal el calor en caso de que se produzcan altas temperaturas durante el funcionamiento. Sin embargo, tiene un alto coeficiente de calor específico, lo que provoca que su temperatura aumente lentamente.

El aceite vegetal es un material muy higroscópico, esto hace que sea muy sensible a la humedad del ambiente y debe estar siempre almacenado correctamente para evitar que absorba humedad y se produzca la degradación del aceite por mecanismos de oxidación. Esto aparentemente es una desventaja, sin embargo, para sistemas de aislamiento papel – aceite vegetal supone una gran ventaja ya que absorbe el agua que se genera en el papel ayudando a protegerlo de los mecanismos de degradación. El papel es la parte del aislamiento más delicada y esta ventaja a la hora de su aplicación en transformadores de potencia permite aumentar la vida útil de los transformadores.

Por estas razones, la tendencia actual es sustituir el aceite mineral por el vegetal, que cada vez está más presente en los transformadores de distribución. Sin embargo, para los grandes transformadores de potencia aún se usa aceite mineral debido a que, para que sean seguros, los transformadores con aceite vegetal deben ser más voluminosos para evacuar mejor el calor y reducir el riesgo de incendio.

2.2 Humedad en el aislamiento.

Como se ha visto anteriormente, el estado del aislamiento está relacionado directamente con la humedad. De este modo deducimos que la vida útil de un

transformador disminuye mucho en caso de existir un porcentaje importante de humedad en el papel y el aceite.

La cantidad de humedad existente en el papel se mide en tanto por ciento en peso, siendo un papel de un 4% o más un papel con un contenido en humedad alto. Sin embargo, la humedad contenida en el aceite se mide en partes por millón (ppm), considerándose con alto contenido en humedad con tan solo 15 ppm [1]. La distribución de la humedad en el aislamiento aceite – papel depende de la temperatura [6].

La aparición de humedad tiene tres posibles orígenes principales: por contacto del interior de la cuba con el exterior y por la temperatura que por un lado descompone el papel y por otro activa las reacciones de oxidación.

La existencia de humedad en un transformador acelera el mecanismo de envejecimiento de los aislantes, proceso que a su vez libera más agua. De este modo cada vez es mayor la velocidad de descomposición del papel y del aceite.

Por tanto y como resumen, las principales consecuencias de tener humedad en un transformador son:

- Disminuye en gran medida la rigidez dieléctrica de los aislamientos y la resistividad.
- Aumentan las pérdidas dieléctricas.
- Rompe las cadenas poliméricas del papel, reduciendo su resistencia a la tracción mecánica.
- Acelera la oxidación del aceite generando a su vez más agua.
- Forma pequeñas vacuolas en el interior del aceite, que son propensas a sufrir rupturas dieléctricas, favoreciendo con ello la formación de lodos y ácidos.

Según el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), un transformador nuevo debe tener un porcentaje de humedad en peso en el papel inferior al 1% y si su porcentaje en humedad es mayor del 4,5% no se puede garantizar su correcto funcionamiento (norma IEEE C57.93, Anexo B).

2.2.1 Método Karl Fischer.

En este proyecto, para calcular la humedad contenida en los aislamientos se ha usado un equipo Karl Fischer. Este aparato usa el método de medida Karl Fischer, que fue inventado por un químico alemán del mismo nombre.

En la figura siguiente se muestra el equipo usado en el estudio. Este aparato se encuentra en una zona habilitada para controlar la temperatura y la humedad, dentro de un laboratorio de la Universidad Carlos III de Madrid.

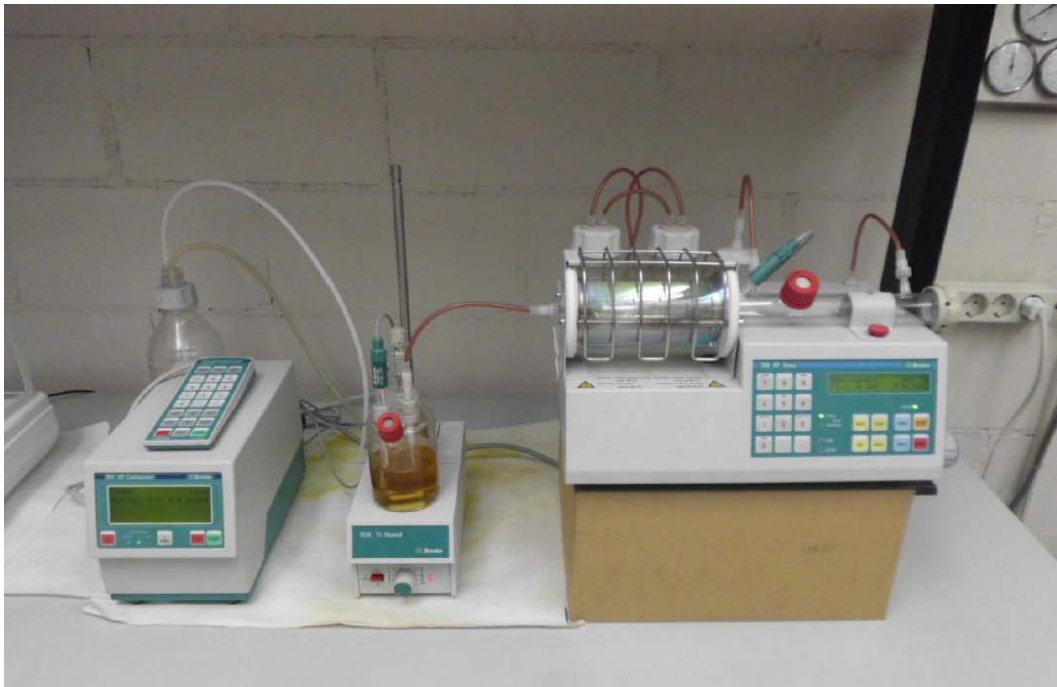


Figura 2.2: Equipo Karl Fischer.

2.3 Espectroscopia dieléctrica.

La espectroscopia dieléctrica es un método para analizar la respuesta dieléctrica de un material aislante. Para ello se le aplica un campo eléctrico variable en el tiempo entre dos electrodos. De este modo se ha analizado la respuesta dieléctrica de la permitividad dieléctrica, magnitud macroscópica, a partir de la cual se obtiene la información de las magnitudes microscópicas en función de la frecuencia y del tiempo [5]. La medida consiste básicamente en calcular la corriente que atraviesa el dieléctrico al aplicar un campo eléctrico variable. Las respuestas dieléctricas obtenidas pueden ser en el dominio del tiempo o de la frecuencia.

La respuesta dieléctrica de un material también depende de la temperatura, aunque para la mayoría de los materiales no influye de manera significativa debido a que la estructura de estos materiales no cambia en el rango de temperatura en el que se realizan los ensayos [6].

Este análisis nos da a conocer la humedad que contiene el aislante y sus propiedades dieléctricas (principalmente la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta), por lo que nos muestra con exactitud el estado en el que se encuentra el aislamiento.

A continuación se explica detalladamente de la respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia, que ha sido el método utilizado en este estudio.

2.3.1 Método FDS.

El método de la respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia, abreviado método FDS (del inglés *Frequency Domain Spectroscopy*), se usa como ya se ha explicado para obtener las características del dieléctrico a estudiar para poder evaluar el estado en el que se encuentra dicho aislante. Es un método que arroja medidas muy fiables.

Para realizar las medidas se aplica un campo eléctrico variable (tensión alterna) a frecuencia constante entre dos electrodos entre los que se introduce el aislante a analizar, formando un condensador. A partir de este circuito de medida se puede calcular la corriente generada que es la variable que aporta la información del dieléctrico. En esta corriente se analizan los procesos de polarización del material que nos darán las medidas concretas de las magnitudes características del aislante [7, 8].

En nuestro estudio, las medidas a tener en cuenta han sido la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta pero el método FDS también da más información.

2.3.2 Capacidad, pérdidas dieléctricas y tangente de delta.

Las principales propiedades de un aislante son la capacidad eléctrica, la tangente de delta y sus pérdidas dieléctricas, y éstas han sido las que se han tenido en cuenta a la hora de tomar las medidas y su posterior análisis. A continuación se detallan los aspectos básicos de estas propiedades.

- Capacidad eléctrica:

Propiedad que tienen todos los materiales y define la facilidad que tienen para almacenar carga eléctrica. También se define como la cantidad de carga que almacena para una determinada tensión [5]. La geometría que tenga el material también de manera importante en su capacidad.

- Pérdidas dieléctricas:

Un material aislante se puede representar como un condensador en un circuito eléctrico. Pero como los aislantes no son ideales, el condensador deberá tener en paralelo una resistencia que represente sus pérdidas dieléctricas al paso de la corriente.

- Tangente de delta:

Delta es el ángulo complementario a ϕ en el diagrama fasorial de un condensador real. Define la cantidad de pérdidas que se producen en un condensador. La tangente de delta nos da la relación entre la intensidad que circula por la rama resistiva y la capacitiva. De este modo, un aceite nuevo tendrá una tangente de delta muy baja (un condensador ideal tendría un ángulo delta igual a cero). Los productos polares que se van produciendo durante el funcionamiento del transformador (lodos, ácidos, etc.) aumentan el valor de la tangente de delta y por tanto aumentan sus pérdidas dieléctricas [1].

La siguiente figura ilustra el circuito eléctrico equivalente de un condensador real, su diagrama fasorial y la fórmula que define la tangente de delta:

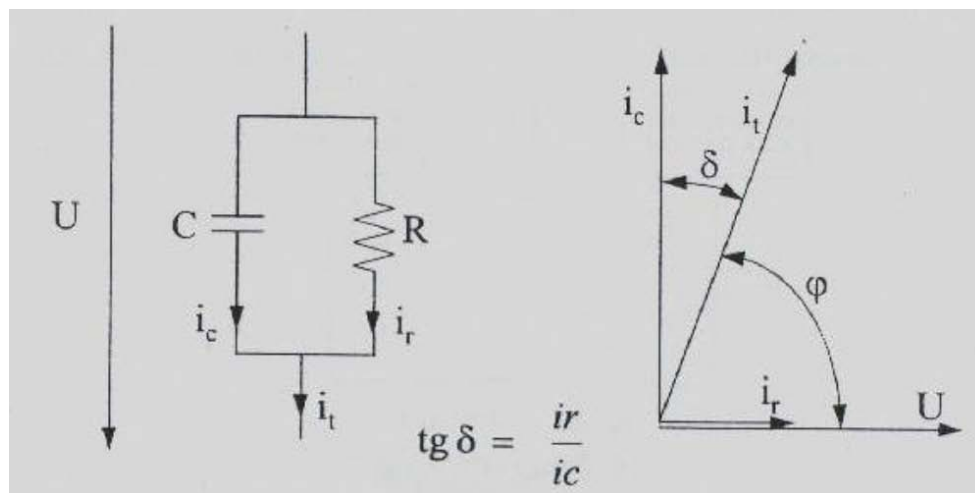


Figura 2.3: Circuito equivalente de un condensador real y su diagrama de fasores. Tomado de [9].

2.3.3 Respuesta dieléctrica en aceite vegetal.

Como hemos podido comprobar en este estudio, la respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia obtenida sobre un material aislante es distinta en función del aislamiento líquido que lo recubre.

Como se ha explicado anteriormente, la técnica FDS estudia los procesos de polarización mediante la medida de la corriente generada por la tensión sinusoidal aplicada y, por tanto, depende en gran medida de la permitividad relativa y de la conductividad volumétrica [7]. De este modo, el tipo de aislamiento líquido empleado tiene una gran repercusión en los resultados de las medidas FDS.

En los documentos [10] y [11] se estudia con más detalle la influencia del tipo de aceite empleado para obtener las medidas de las muestras a analizar.

En el capítulo 5 se compararán los resultados obtenidos en ambos aceites y se podrán analizar las diferencias obtenidas.

2.3.4 IDA 200.

En este estudio, el instrumento empleado para analizar la respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia de las muestras ha sido el IDA 200 (*Insulation Diagnostic Analyzer*). Este equipo se muestra en la siguiente imagen:



IDA 200 empleado en este estudio. Tomado de [12].

Con este equipo se han tomado medidas de las distintas muestras obteniendo los valores de la capacidad, las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta a una tensión de 100 V y un rango de frecuencias de 1 mHz a 1 kHz. El valor de la tensión y el rango de frecuencias fueron elegidos porque se consideró que de esta manera se obtenía la información requerida de las muestras pero el IDA 200 permite aplicar una tensión entre 10 – 200 V y un rango de frecuencias de 0,1 mHz a 1kHz.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

En los siguientes apartados se detalla el proceso de construcción de los objetos de ensayo, el método empleado para preparar y conservar las muestras y el procedimiento que se ha seguido a la hora de obtener las medidas.

3.1 Diseño del objeto de ensayo.

El sensor se basa en un cilindro metálico en el que se enrolla el papel Kraft. La función del cilindro es, por una parte soportar el papel impregnado en aceite que será medido y por otra formar un electrodo para realizar las medidas con el método FDS, gracias a su estructura metálica. Fue diseñado por el Departamento de Ingeniería de la Universidad, por el grupo de investigación DIAMAT (Diagnosis de máquinas eléctricas, cables y materiales aislantes).

La estructura metálica es un cilindro octogonal que consta de un núcleo de aluminio en el que va enrollado el papel impregnado en aceite y una malla metálica de acero inoxidable (AISI 304) que lo recubre. Para que el diseño fuera correcto se estudió el tipo de malla y sus medidas para ver el efecto que tiene en los procesos de migración de humedad entre el papel y el aceite. El diseño elegido se explica en [13]. Las dimensiones finales del objeto de ensayo se detallan en el siguiente esquema:

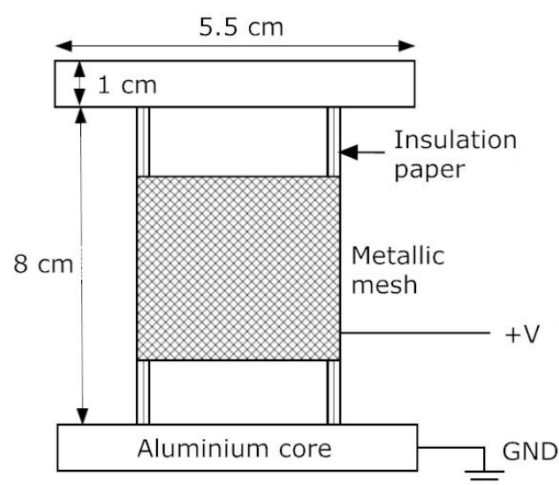


Figura 3.1: Dimensiones del objeto de ensayo. Tomado de [13].

Como se explicó anteriormente, el método FDS se basa en medir sobre un condensador con dos electrodos entre los que se introduce el material a estudiar. De este modo se obtiene un sensor capacitivo que nos permitirá analizar el estado del aislamiento.

En nuestro caso, los electrodos son el núcleo de aluminio y la malla metálica. Entre ellos se sitúa el papel impregnado en aceite del que se obtendrán las medidas. La malla debe tener un tamaño de agujero determinado para no interferir en los procesos de migración de humedad entre el papel y el aceite. Después de las pruebas realizadas la malla que se eligió tiene un tamaño de agujero cuadrado de 0,75 mm de lado [13]. En la siguiente imagen se muestra el aspecto real de los objetos de ensayo. Se puede observar que uno de ellos tiene unos “bocados” de los que se obtiene la muestra del papel para analizarla en el Karl Fischer.



Figura 3.2: Objeto de ensayo. Tomado de [13].

El objeto de ensayo así construido se sumerge en una cuba de teflón llena de aceite vegetal. La cuba no está tapada para conectar el cable al núcleo de aluminio (electrodo de alta tensión) y tiene un agujero en un lateral con un tornillo que hace contacto con la malla (electrodo de baja tensión) para conectar el cable de baja. En la siguiente imagen se observa la cuba vacía de aceite con el objeto de ensayo dentro:



Figura 3.3: Cuba con un objeto de ensayos en su interior.

3.2 Preparación de las muestras.

Una vez preparada la estructura física que sostendrá las muestras se prepararon las muestras, hasta un total de dieciocho con porcentajes de humedad del 1% al 6% (tres por cada porcentaje de humedad a estudiar). De cada porcentaje de humedad, se usaron dos objetos de ensayo para realizar las medidas y de este modo comprobar que ambas medidas son coherentes y el tercero queda como patrón.

Para ello la fabricación de las muestras se siguió el siguiente procedimiento:

- Se empieza bobinando el papel al núcleo metálico. Para ello se pega con adhesivo la primera capa a la estructura de aluminio y se enrolla en una máquina de bobinado para que todos los objetos de ensayo sean iguales. El bobinado consta de 40 capas de papel Kraft y un grosor total de 3 mm.

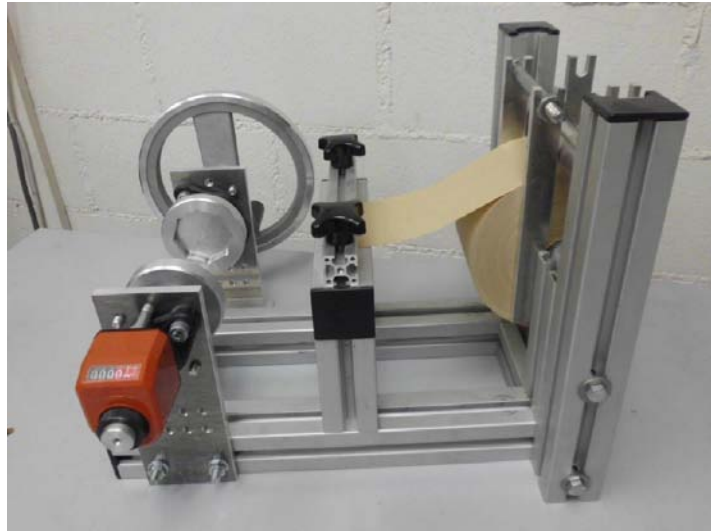


Figura 3.4: Máquina de bobinado para los objetos de ensayo.

- Seguidamente se introducen en una estufa de vacío a 70 °C durante 24 horas para eliminar la humedad que puedan haber cogido del ambiente y así garantizar que todos los objetos parten de un porcentaje de humedad igual y muy bajo.
- Después se humectan las muestras con unas disoluciones de sales especiales. Se introducen en recipientes herméticos durante un mes aproximadamente para que alcancen el porcentaje de humedad deseado. Para las muestras con humedad del 1% al 4% se usa el fluoruro de cesio y para las del 5% y 6% se usa el Bromuro de litio.
- Cuando las muestras obtienen el porcentaje de humedad deseado se colocan las mallas con unas bridas. Esta operación se realiza en la zona de humedad controlada habilitada en el laboratorio para evitar la contaminación de las muestras.

Una vez preparados todos los objetos de ensayo se guardan en recipientes herméticos para que no varíen sus porcentajes de humedad hasta el momento en el que se realicen las medidas.

3.3 Protocolo de medida.

El protocolo de medida consiste en seguir una serie de pasos para realizar las medidas de forma correcta y sin alterar las condiciones de las muestras. El proceso seguido es el siguiente:

- Para que no se alteren las condiciones de humedad de las muestras, el proceso de sacar los objetos de ensayo del recipiente hermético e introducirlos en las dos cubas se realiza en la zona con control de temperatura del laboratorio. Se rellenan las cubas de aceite vegetal hasta que los objetos de ensayo quedan cubiertos completamente y se toma una muestra del aceite de cada cuba para analizar su contenido en humedad con el Karl Fischer. Ambos objetos son del mismo porcentaje de humedad.
- Seguidamente se introducen las cubas en el horno a 30 °C y se dejan reposar durante unas 20 horas aproximadamente para que se produzca el intercambio de humedad entre el aceite y el papel y así hacer la medida en condiciones de equilibrio de humedad. Una vez estabilizadas, se toma una muestra del aceite de cada cuba.
- Finalmente se realizan las medidas FDS a las dos muestras. Todas las medidas se hacen una tensión de salida del IDA de 100 V. Se hacen dos medidas por muestra, una con rango de frecuencias de 10 mHz a 1kHz (duración aproximada de 8 minutos y medio) y otra de 1 mHz a 1kHz (duración aproximada de 1 hora y 10 minutos) y se comprueba que ambas medidas se solapan, confirmando que son correctas de ser así. Tras realizar las cuatro medidas, los resultados que deben salir en caso de ser correctas son:
 1. Las dos medidas realizadas sobre una misma muestra deben estar solapadas completamente.
 2. Las medidas entre las distintas muestras pueden diferir ligeramente debido a que las muestras no tendrán exactamente la misma cantidad de humedad. Las variaciones deben ser coherentes, es decir, para un punto a una frecuencia determinada tendrá una capacidad mayor la muestra con mayor contenido en humedad.
- Después de realizar las medidas, se toman muestras del papel y del aceite para analizar con el Karl Fischer. Estos análisis nos demuestran si las medidas FDS han salido correctamente.

Durante la etapa experimental, en algunos casos obtuvimos medidas incoherentes. En estos casos revisamos las conexiones y volvimos a medir para obtener las medidas correctas.

En la siguiente ilustración se muestra el esquema de medición empleado para tomar las medidas FDS de las muestras:

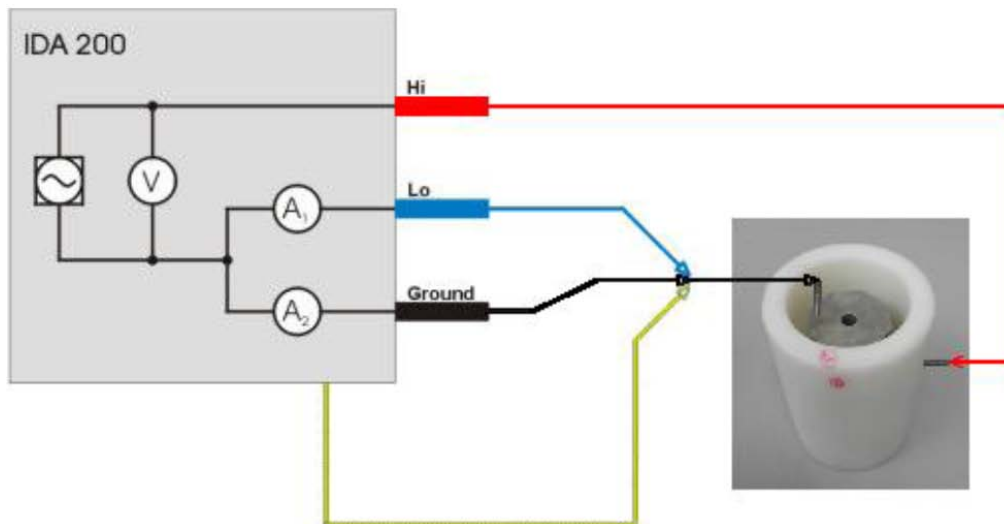


Figura 3.5: Esquema de medición empleado en las medidas FDS. Tomado de [14].

En la imagen se muestra el conexionado. El cable de alta tensión se conecta a un electrodo que hace contacto en el lateral de la muestra y los demás se conectan al electrodo superior.

4. RESULTADOS OBTENIDOS.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos durante este trabajo. En primer lugar se muestran las medidas de humedad sobre el papel y el aceite realizadas de forma directa sobre el Karl-Fischer, a continuación se muestran los resultados de las medidas dieléctricas sobre las muestras de distintas humedades, y por último se hace un estudio de tendencias sobre los resultados obtenidos.

4.1 Medidas directas de humedad sobre las muestras.

En la siguiente tabla se muestran los datos de humedad en porcentaje y partes por millón obtenidos en las medidas:

MEDIDAS	HUMEDAD EN EL ACEITE ANTES DE MEDIR (ppm)	HUMEDAD EN EL ACEITE DESPUÉS DE MEDIR (ppm)	HUMEDAD EN EL PAPEL (%)
Humedad 1%, medida 1	124,5	126,3	1,20
Humedad 1%, medida 2	128,3	129,5	1,36
Humedad 2%, medida 1	193,2	214,5	2,14
Humedad 2%, medida 2	197,8	215,1	2,13
Humedad 3%, medida 1	245,5	269,7	3,31
Humedad 3%, medida 2	252,0	265,9	3,26
Humedad 4%, medida 1	276,0	280,7	4,11
Humedad 4%, medida 2	274,5	282,6	4,15
Humedad 5%, medida 1	288,5	281,7	5,16
Humedad 5%, medida 2	292,7	285,7	5,10
Humedad 6%, medida 1	315,6	293,6	6,26
Humedad 6%, medida 2	319,3	293,4	6,18

Tabla 4.1: Humedad de las muestras y el aceite vegetal.

Con los datos de la tabla se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- La humedad en el aceite aumenta al aumentar la humedad de la muestra.
- Hay variaciones de humedad entre las medidas de antes y después de medir con el IDA, aunque son muy pequeñas.
- La concentración de humedad medida en el aceite vegetal varía mucho entre las distintas medidas (desde 124,5 hasta 319,3 ppm). Esto se debe a la alta capacidad de absorber humedad del aceite vegetal, que hace que en el caso de muestras de papel preparadas con alto contenido de humedad una buena cantidad de agua migre al aceite.
- Los porcentajes de humedad del papel son muy similares.

En este proyecto se estudian los resultados de muestras con contenidos de humedad comprendidos entre 1% y 6% aunque en la realidad no se dan transformadores con contenidos de humedad superiores al 4% debido a que se retiran del servicio antes por su alta posibilidad de fallo o bien se someten a un tratamiento de secado en campo.

En todos los casos, las dos medidas realizadas sobre una misma muestra (una de ellas en un rango de frecuencias de 1 kHz a 10 MHz y la otra hasta 1 MHz) se ajustan perfectamente garantizando que las medidas son coherentes. Para analizar los resultados tomamos la medida correspondiente al rango 1 kHz - 1 MHz, ya que nos aporta más información de la capacidad, pérdidas dieléctricas y tangente de delta.

4.2 Medidas dieléctricas.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en las medidas de las propiedades dieléctricas a analizar en este estudio. Los resultados de la capacidad, pérdidas dieléctricas y tangente de delta se representan mediante gráficas.

4.2.1 Capacidad.

Los resultados de la capacidad en función de la frecuencia de las muestras obtenidos con el IDA 200 son:

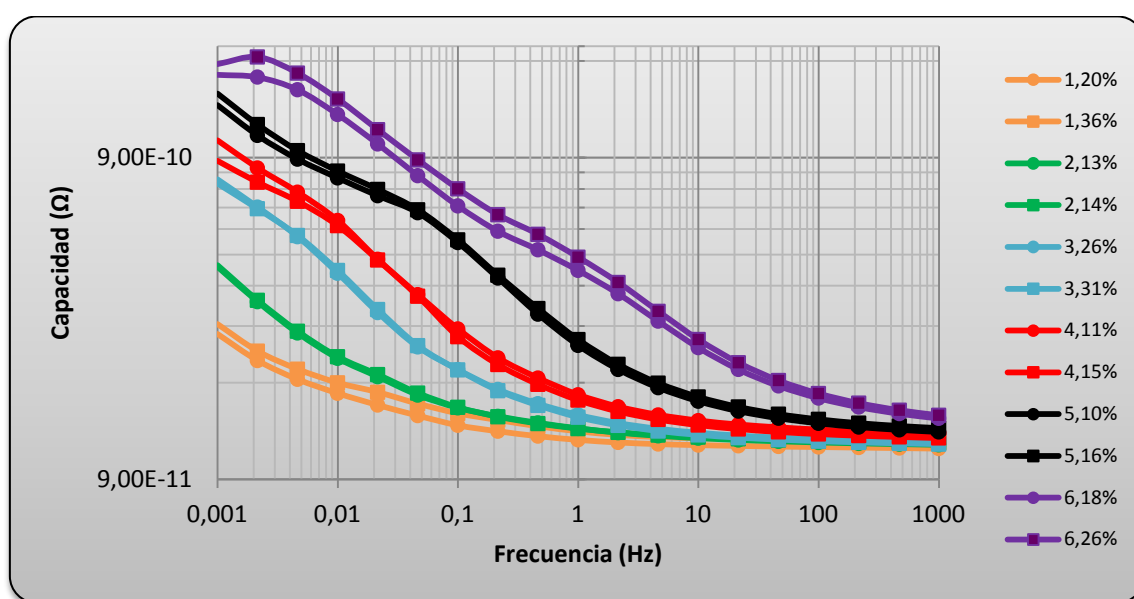


Figura 4.1: Gráfica con los resultados de la capacidad en el aceite vegetal.

Se observa que la capacidad aumenta al disminuir la frecuencia y es menor en las muestras con menor contenido de humedad. Las muestras con igual porcentaje de humedad quedan casi totalmente superpuestas debido a que la diferencia de humedad es mínima. Las muestras hay una mayor coincidencia son las de 2% y 3% de humedad. Se puede observar que, a excepción de las muestras del 1% (que tienen una mayor diferencia de humedad), las muestras con menor contenido de humedad se superponen mejor.

Las curvas a alta frecuencia, que es donde comienza la medida, están muy juntas aunque se aprecia que las muestras con más humedad tienen mayor capacidad. Según va disminuyendo la frecuencia se aprecia que la tendencia de las curvas es distinta, dependiendo del porcentaje de humedad que tengan. La capacidad crece con mayor rapidez en las curvas de mayor contenido de humedad.

Las curvas de la capacidad en función de la frecuencia se pueden asemejar a curvas exponenciales, debido a que su pendiente es cada vez mayor según disminuye la frecuencia. Esta semejanza es más aproximada en las curvas con humedad de hasta el 4%. Las curvas con porcentajes del 5% y 6% tienen tendencias más inestables y sus pendientes de crecimiento varían mucho a lo largo de la curva. Este hecho no es muy importante debido a que en un transformador real no se da un aislamiento con un contenido de humedad tan alto.

En las medidas realizadas sobre las muestras de 6% de humedad se obtuvo una supuesta anomalía. Al final de la gráfica ($f = 0,001$ Hz) se observa como empieza a descender levemente la capacidad. Este problema se produjo de forma más clara en las medidas con aceite mineral de las muestras de 6% de humedad. Este suceso también ocurrió en otros experimentos anteriores por lo que suponemos que es algo normal para muestras con alto contenido de humedad.

4.2.2 Pérdidas dieléctricas.

Las pérdidas dieléctricas por conducción son una de las características más importantes de los materiales aislantes y la que guarda mayor relación con el contenido de humedad de la muestra. Los datos obtenidos de las pérdidas dieléctricas en función de la frecuencia de las muestras son:

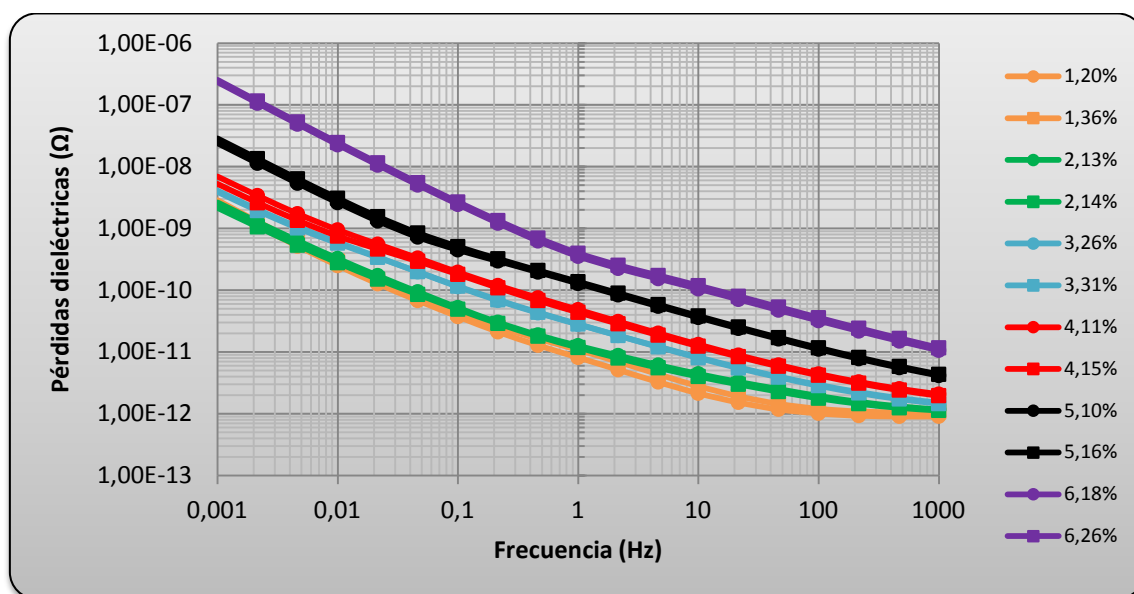


Figura 4.2: Gráfica con los resultados de las pérdidas dieléctricas en el aceite vegetal.

En esta gráfica tenemos un comportamiento muy uniforme en la tendencia de las curvas para todas las muestras, independientemente de que tenga un contenido en humedad muy diferente. Como es lógico, tienen pérdidas dieléctricas mayores las muestras que contienen más agua. En esta gráfica quedan casi perfectamente superpuestas todas las curvas con similar porcentaje de humedad, incluso entre las que hay más diferencia de humedad y sin importar si tienen contenidos altos o bajos de humedad.

En este caso, las curvas obtenidas se pueden asemejar a una recta de pendiente constante e igual para todas, como se analizará con más detalle en el apartado 4.3 de este mismo capítulo. Las pérdidas dieléctricas crecen a medida que disminuye la frecuencia. Se puede apreciar que las curvas crecen con un poco más de rapidez a bajas frecuencias, es decir tienen un crecimiento ligeramente mayor para el rango 0,001 – 1 Hz que en 1 – 1000 Hz.

Como anomalía, se observa que las curvas de 1% y 2% se cruzan. Las curvas de 1%, 2%, 3% y 4% de humedad tienden a juntarse a bajas frecuencias mientras que las de 5% y 6% tienden a separarse más del resto en esta zona. Esto se observa con más detalle en el siguiente zoom de la zona de baja frecuencia de la gráfica:

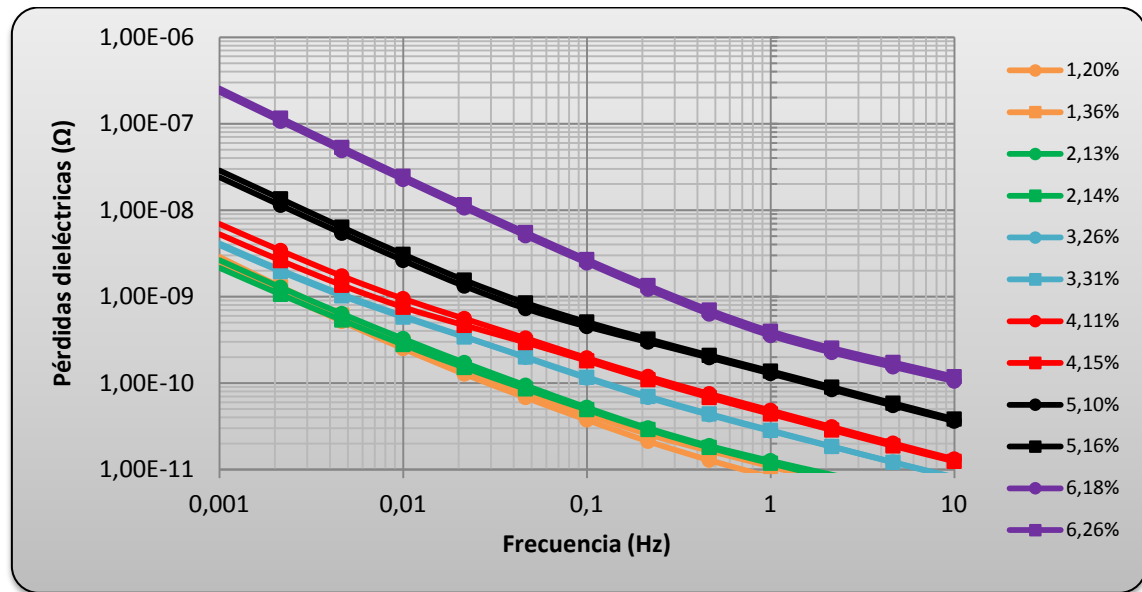


Figura 4.3: Gráfica con los resultados de las pérdidas dieléctricas en el aceite vegetal. Zona de baja frecuencia.

4.2.3 Tangente de delta.

Los resultados que nos da el IDA 200 sobre la tangente de delta en función de la frecuencia de las muestras son:

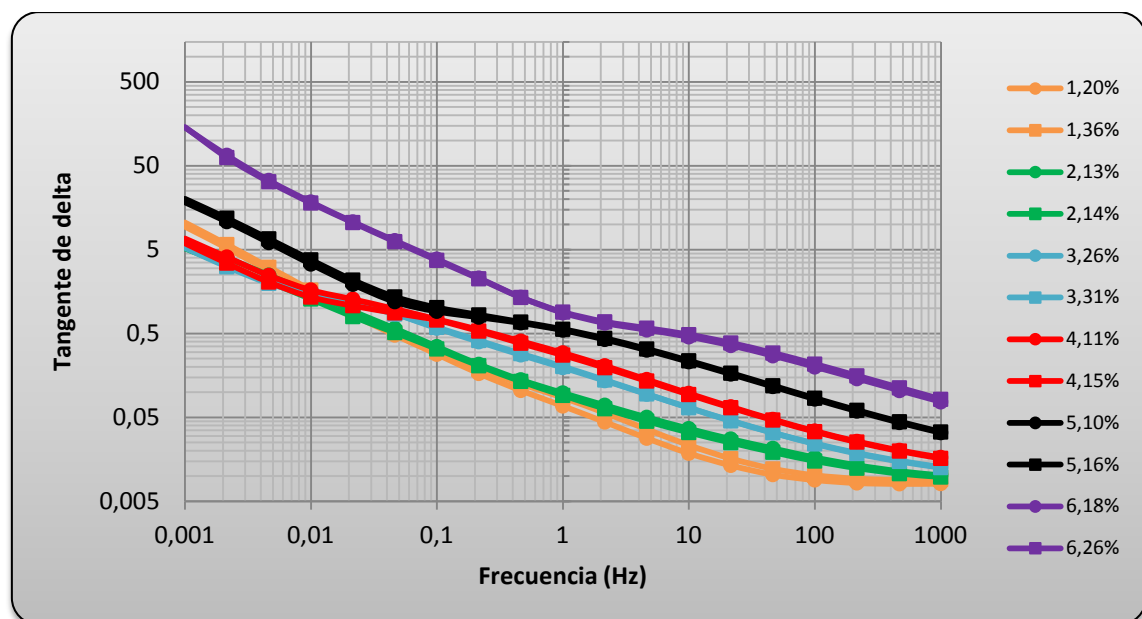


Figura 4.4: Gráfica con los resultados de la tangente de delta en el aceite vegetal.

Como se observa, la tangente de delta también aumenta al disminuir la frecuencia y aumentar la humedad. En este caso, las curvas de tangente de delta también se solapan totalmente por sus parecidos contenidos de humedad, con independencia de si contienen humedades altas o bajas.

Las curvas son similares a grandes rasgos con una recta de pendiente constante excepto en el rango 0,01 – 1 Hz en el que hay un punto de inflexión, circunstancia parecida a la ocurrida en la gráfica de las pérdidas dieléctricas pero más acentuada en este caso. El cambio en el crecimiento de las curvas es mayor cuanto mayor contenido de humedad tenga la muestra. Este efecto tiende a juntar las curvas, incluso provoca que se crucen algunas de ellas.

En la siguiente gráfica se puede observar un aumento de la zona en la que cambia el comportamiento de las curvas:

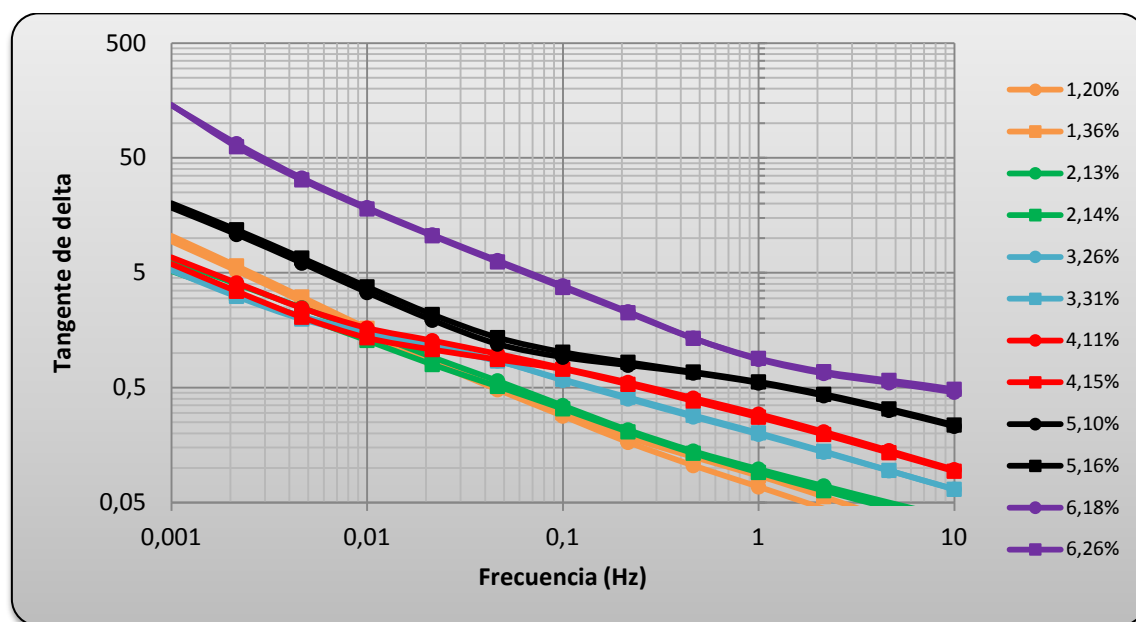


Figura 4.5: Gráfica con los resultados de la tangente de delta en el aceite vegetal. Zona del cambio de pendiente.

En esta gráfica se observa con mayor detalle como en las muestras con mayor contenido de humedad la pendiente cambia en frecuencias mayores (las muestras del 6% cambian de pendiente a $f = 1$ Hz). El cambio de pendiente produce que las curvas con 5% y 6% de humedad se separen del resto. Las curvas con humedades del 3% y 4% sufren un cambio de pendiente en sentido contrario que incluso hace que algunas curvas se crucen, como sucede en el caso de 4% y 1%. También se cruzan las curvas del

2% con las del 1% aunque con un cambio de pendiente menos brusco. Las únicas curvas en las que no se aprecian cambios de tendencia en esta zona son las de 1% de humedad.

4.3 Tendencia para las curvas de las humedades a una frecuencia determinada.

Después de analizar las variables del papel frente a la frecuencia, en este apartado se analizarán las tendencias de las curvas de capacidad, pérdidas dieléctricas y tangente de delta para las frecuencias elegidas frente a la humedad en tanto por ciento. Esta nueva forma de representar los datos obtenidos con el IDA 200 nos sirve para conocer la humedad cuando medimos una de las variables estudiadas a una determinada frecuencia. Para observar las tendencias de las variables las frecuencias elegidas son los múltiplos de 10 dentro del rango 0,001 - 1000 Hz.

Las gráficas se han hecho tomando una de las dos medidas para cada porcentaje de humedad. De este modo se evita la aparición de “saltos” entre puntos con humedades parecidas, concretamente entre los puntos con humedades del 4%, 5% y 6%. Esto es debido a que los resultados expuestos en esta gráfica provienen de dos muestras distintas para cada nivel de humedad, por lo que no dan resultados totalmente uniformes.

4.3.1 Capacidad.

En este caso se puede estimar el contenido de humedad de un transformador habiendo medido previamente la capacidad para una frecuencia determinada. En la siguiente gráfica se representa las tendencias de la capacidad a unas determinadas frecuencias frente a la humedad:

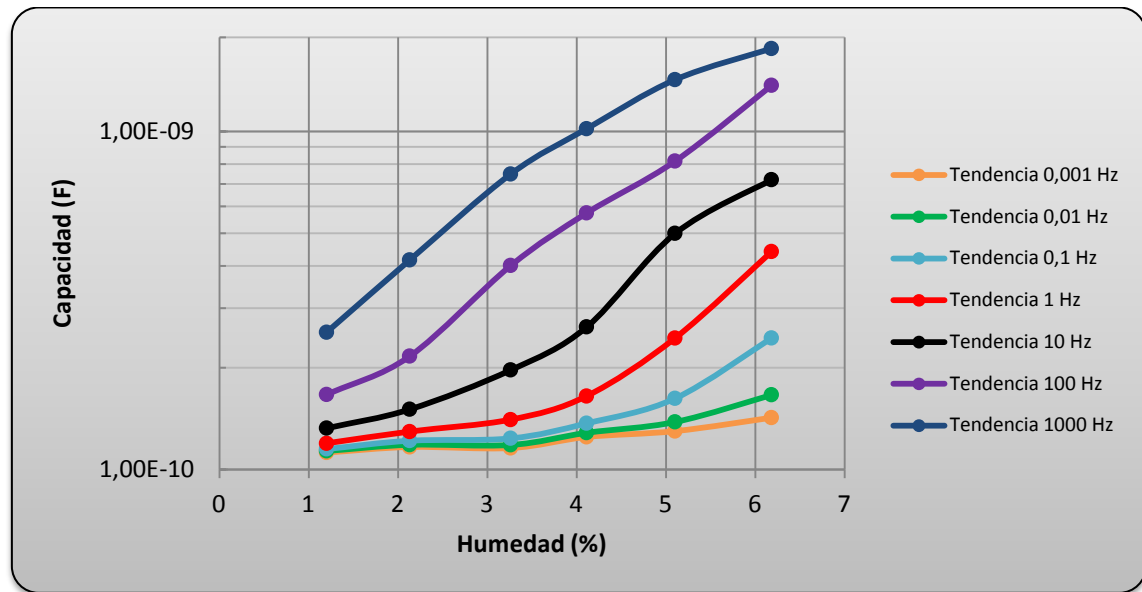


Figura 4.6: Gráfica de las tendencias de la capacidad a las frecuencias determinadas.

Se observa que la tendencia de las curvas de frecuencia constante es creciente hacia humedades y capacidades más altas. La capacidad aumenta más rápido en las curvas de frecuencia mayor. Las curvas no tienen la misma tendencia para cada frecuencia. Las curvas de 0,001 mHz a 10 Hz se asemejan a una exponencial y empiezan en un valor de la capacidad similar. La curva de 100 Hz presenta una tendencia irregular con varios cambios de pendiente. Finalmente, la curva de 1000 Hz tiene una disminución progresiva de su pendiente.

4.3.2 Pérdidas dieléctricas.

Ahora serán las pérdidas dieléctricas la variable a medir para conocer el estado del papel del transformador. A continuación se representa la tendencia de las pérdidas dieléctricas frente a la humedad a distintas frecuencias:

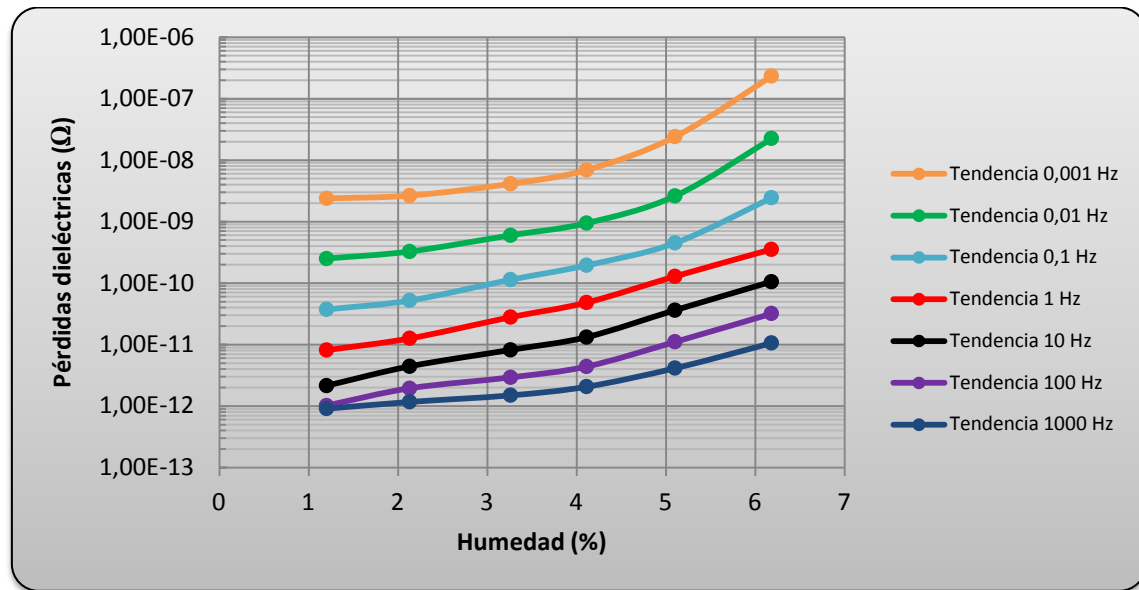


Figura 4.7: Gráfica de las curvas de tendencia de las pérdidas dieléctricas a las frecuencias determinadas.

En la gráfica anterior, se observa que la tendencia, salvo en algunos puntos, es similar en todas las curvas y tienen un gran paralelismo, a diferencia de las otras gráficas de tendencia. Las curvas de tendencia de frecuencias menores tienen un valor de pérdidas dieléctricas mayor, y aumentan al aumentar la humedad. Las curvas de frecuencias menores (0,001 Hz y 0,01 Hz) presentan una tendencia más parecida a una curva exponencial mientras que las demás se asemejan más a una recta de pendiente constante. Como anomalía con respecto a las otras curvas, tenemos que las curvas de tendencia a 100 y 1000 Hz empiezan en un punto muy próximo.

4.3.3 Tangente de delta.

Por último se muestran los resultados de la tangente de delta para las frecuencias elegidas que nos darían el valor del contenido de humedad:

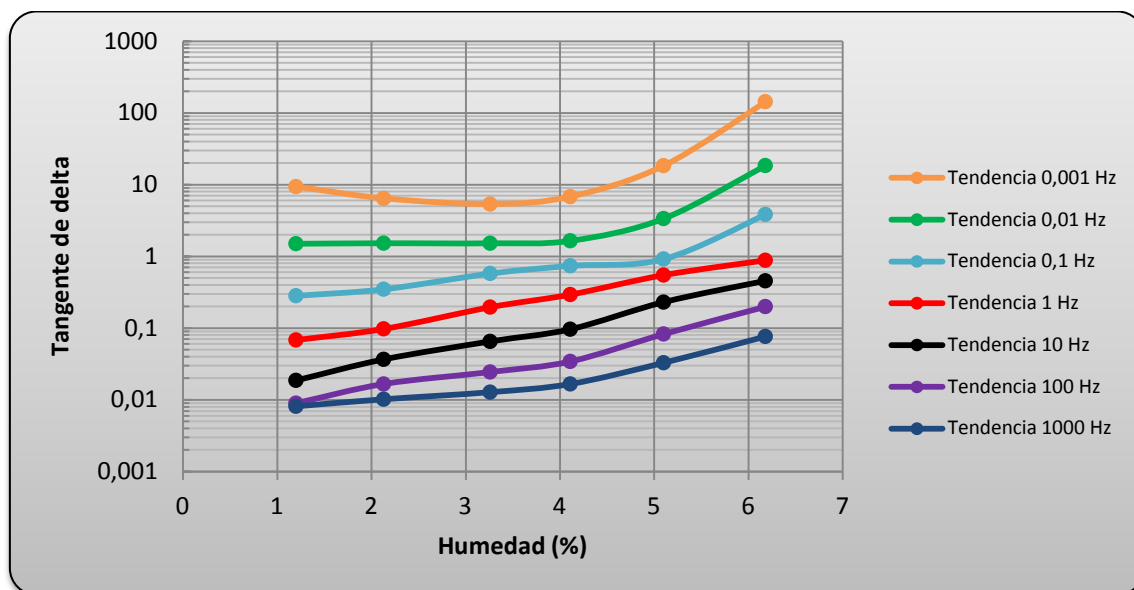


Figura 4.8: Gráfica de las curvas de tendencia de la tangente de delta a las frecuencias determinadas.

En esta gráfica, se observa que la tendencia de las curvas de frecuencia no es uniforme. Las curvas de frecuencia menor (0,001 y 0,01 Hz) tienen forma cóncava mientras que las demás tienen una tendencia creciente hacia humedades más altas pero con pendientes variables dentro de las curvas de frecuencia constante. Tienen una tangente de delta mayor las curvas con menor frecuencia. En este caso, al igual que para las pérdidas dieléctricas, las curvas de tendencia de 100 Hz y 1000 Hz empiezan en un punto muy próximo.

4.4 Ecuación matemática de las curvas de las pérdidas dieléctricas.

En este apartado se caracterizarán las curvas de las pérdidas dieléctricas mediante una ecuación matemática. Para hallar la ecuación se toma el rango de frecuencias 0,001 - 10 Hz.

El estudio de este apartado pretende conseguir un método para calcular la humedad de las muestras a partir de las pérdidas dieléctricas y de la frecuencia. El método es similar al propuesto en el apartado 4.3.2 para las líneas de tendencia y consiste en medir con el IDA 200 a una frecuencia determinada y a partir de los resultados obtenidos estimar la humedad comparando las pérdidas dieléctricas a esa frecuencia con medidas anteriores de distintas humedades. Las ecuaciones calculadas a continuación nos dan esta información.

Las muestras con humedades de 5% y 6% no se caracterizan puesto que son humedades demasiado altas que no se dan en casos reales, por lo que sus ecuaciones no nos dan información útil. Las muestras a caracterizar son 1,20%, 2,13%, 3,26% y 4,11%. Se eligen éstas por ser más cercanas a su número entero en tanto por ciento de humedad que es lo que queremos caracterizar. De este modo, las curvas a analizar son las siguientes:

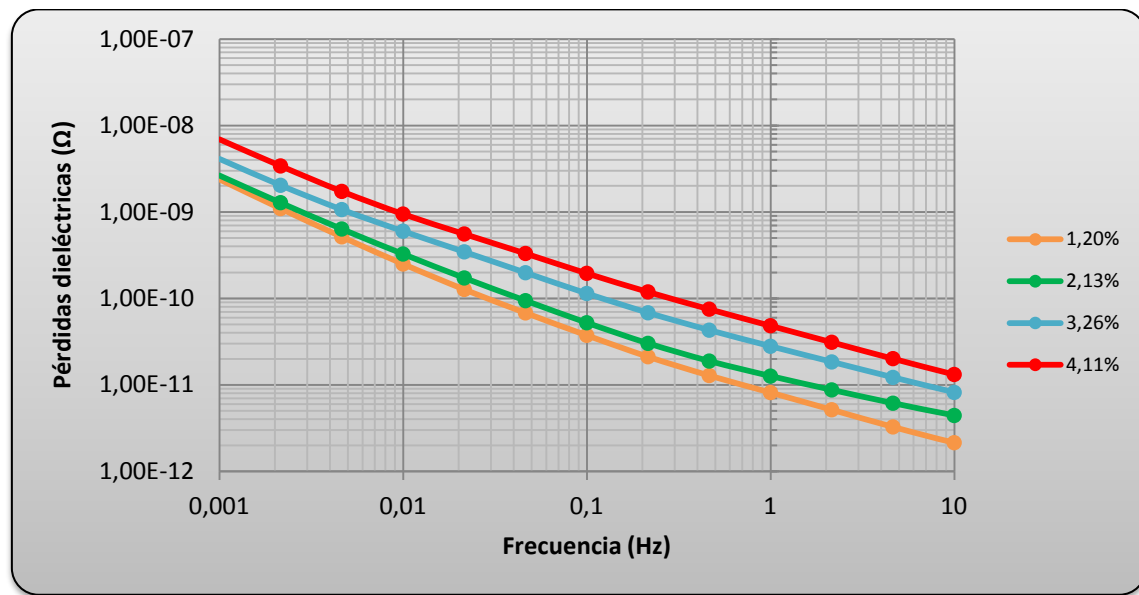


Figura 4.9: Pérdidas dieléctricas en el aceite vegetal. Curvas a caracterizar con su ecuación matemática.

Como se ha analizado antes, las curvas de las pérdidas dieléctricas se pueden asemejar a rectas de pendiente constante, crecientes de altas a bajas frecuencias. En las siguientes gráficas se muestran las curvas con sus rectas representativas y los factores R^2 , que nos da la variación de las pérdidas dieléctricas al variar la frecuencia:

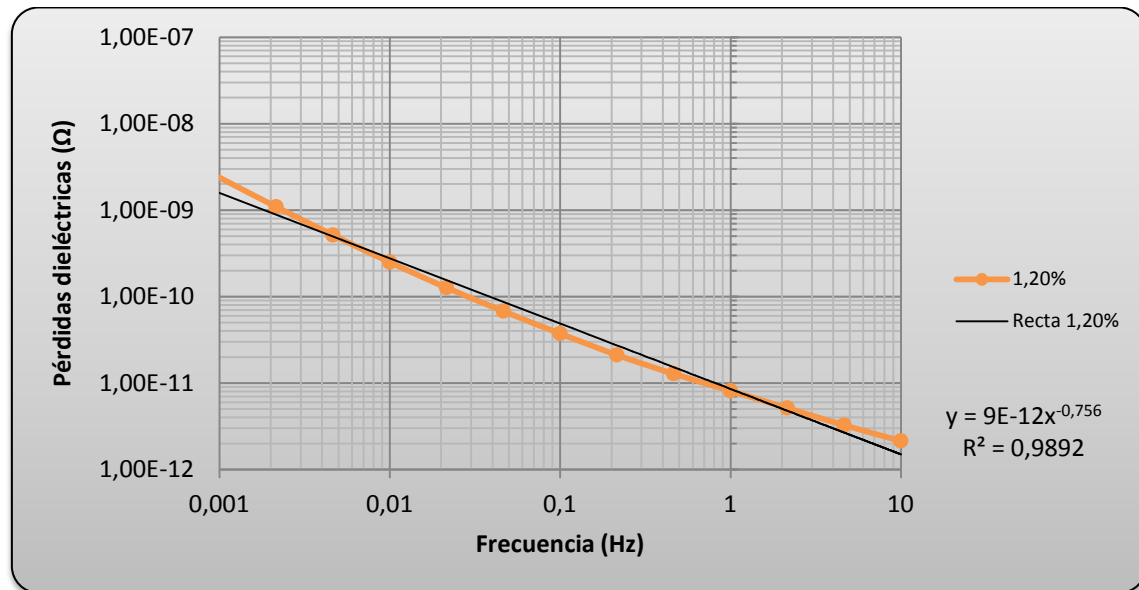


Figura 4.10: Curva de 1,20% de humedad. Recta ajustada.

La muestra elegida para representar la recta de pérdidas dieléctricas de la humedad 1,20% nos da la siguiente ecuación y R^2 :

$$P_d = 9 \cdot 10^{-12} \cdot f^{-0.756}$$

$$R^2 = 0.9892$$

Esta recta se puede tomar como referencia para las muestras con un 1% de humedad ya que su pendiente es característica de las muestras con este contenido de humedad.

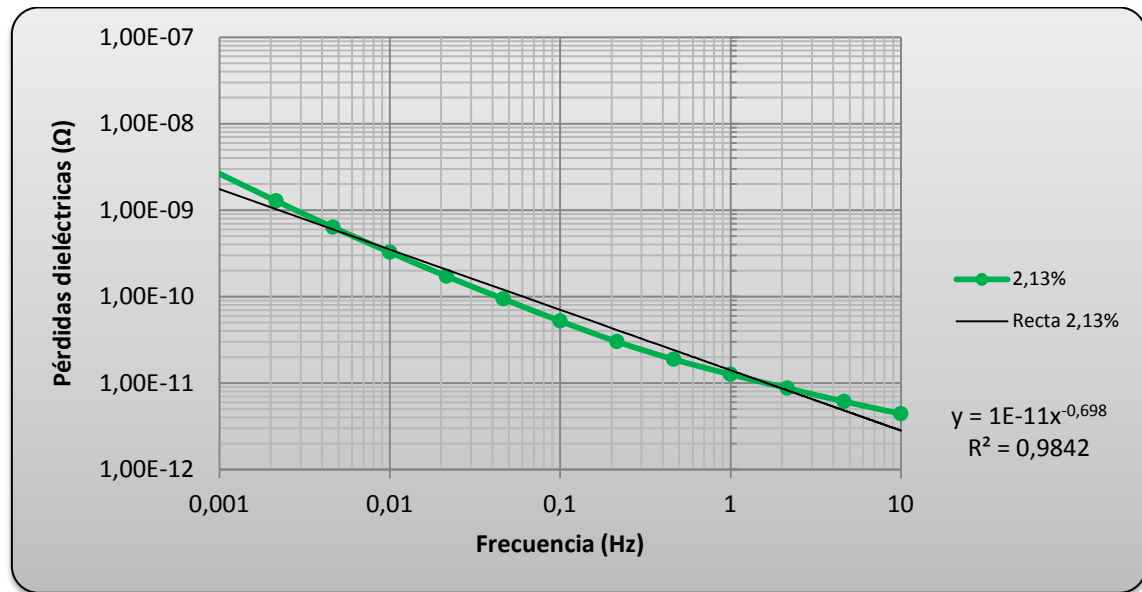


Figura 4.11: Curva de 2,13% de humedad. Recta ajustada.

La muestra que represente la recta de pérdidas dieléctricas de 2,13% de humedad tiene la siguiente ecuación:

$$P_d = 1 \cdot 10^{-11} \cdot f^{-0,698}$$

$$R^2 = 0,9842$$

Esta recta la tomamos como referencia para las muestras con un 2% de humedad.

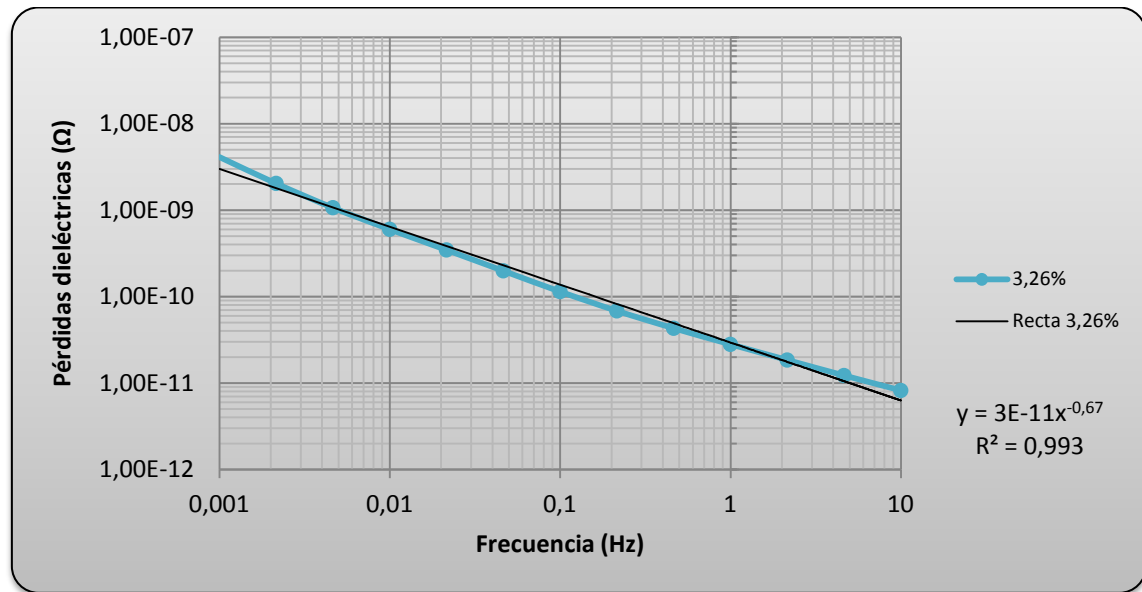


Figura 4.12: Curva de 3,26% de humedad. Recta ajustada.

Para representar la recta de pérdidas dieléctricas de la humedad 3,26% tenemos la siguiente ecuación:

$$P_d = 3 \cdot 10^{-11} \cdot f^{0.67}$$

$$R^2 = 0.993$$

Esta recta tiene la pendiente que caracteriza las muestras con un 3% de humedad.

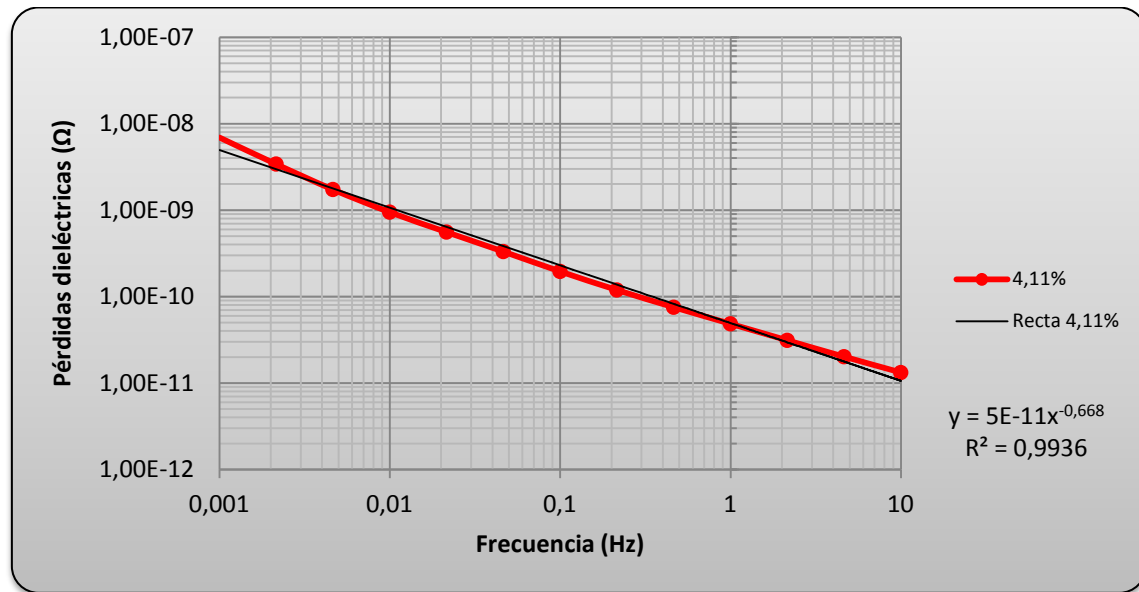


Figura 4.13: Curva de 4,11% de humedad. Recta ajustada.

La ecuación que representa la recta de pérdidas dieléctricas de la humedad 4,11%, junto con su factor R^2 , es:

$$P_d = 5 \cdot 10^{-11} \cdot f^{-0,668}$$

$$R^2 = 0,9936$$

Tomamos esta recta característica como referencia para las muestras con un 4% de humedad.

Se demuestra que, como ya se podía observar en anteriores gráficas, las rectas características se encuentran más desplazadas hacia arriba en el eje de las pérdidas dieléctricas cuanto mayor es el contenido de humedad de la muestra. Es una conclusión lógica porque como sabemos las pérdidas dieléctricas en un material aislante aumentan si están contaminados por elementos que reduzcan su rigidez dieléctrica y permitan que les pueda atravesar una corriente eléctrica mayor.

Las ecuaciones de las curvas de ajuste son curvas exponenciales, que toman la forma de recta al ser representadas en gráficas con ejes exponenciales. Las ecuaciones son del tipo:

$$y = k \cdot f^h$$

$$\log(y) = \log(k) - h \cdot \log(f)$$

Donde “y” son las pérdidas dieléctricas, “k” una constante, “f” la frecuencia y “h” la pendiente de la recta.

Con el método propuesto, midiendo con el IDA 200 las pérdidas dieléctricas a una frecuencia determinada podemos calcular la pendiente h y obtener la humedad en tanto por ciento.

Por tanto, otra forma de mostrar los datos obtenidos que nos aporta más información es representar la pendiente “h” en función de la humedad en tanto por ciento. Esto nos da la siguiente gráfica para las curvas ajustadas anteriores:

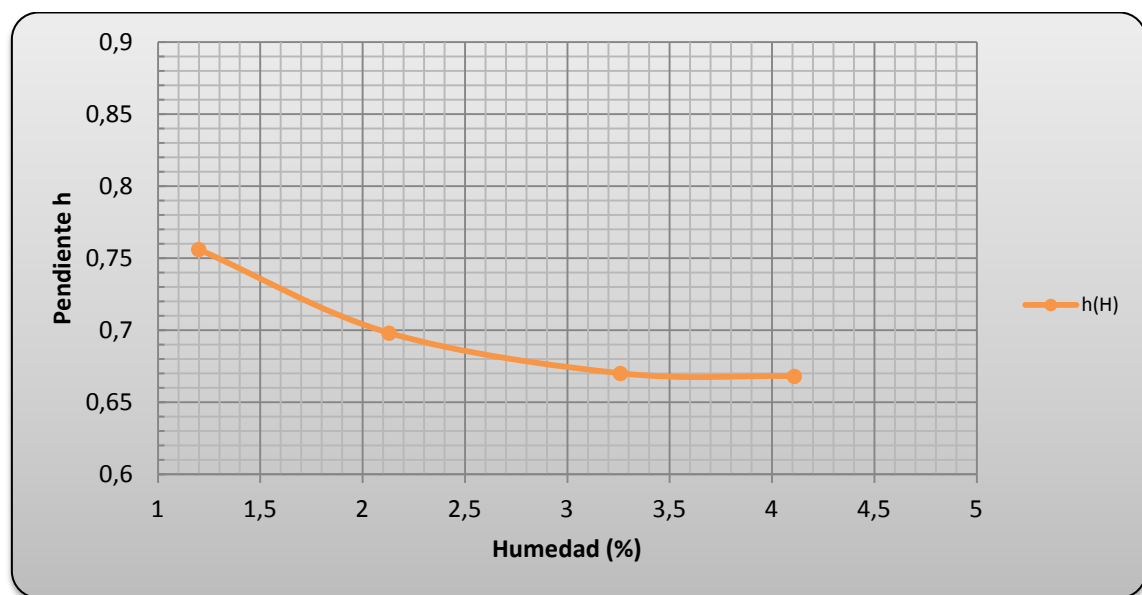


Figura 4.14: Gráfica de h(H%)

En la gráfica se observa que la pendiente “h” disminuye según aumenta la humedad. Esta disminución es cada vez menor a medida que nos acercamos a humedades altas.

5. COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS OBTENIDAS EN PAPEL IMPREGNADO CON ACEITE VEGETAL CON LAS OBTENIDAS EN PAPEL IMPREGNADO EN ACEITE MINERAL.

En este capítulo se compararán los resultados de la capacidad, pérdidas dieléctricas y tangente de delta de este proyecto con los obtenidos en el estudio en el que el aceite empleado era de origen mineral. El método de medida empleado es el mismo en ambos casos por lo que las variaciones se deberán únicamente al uso de distintas muestras y distinto aislamiento líquido.

5.1 Comparación de las propiedades del aceite vegetal y mineral.

En primer lugar se comparan las principales características del aceite vegetal BIOTEMP de ABB y el aceite mineral Nytro Taurus de Nynas.

CARACTERÍSTICAS	ACEITE VEGETAL	ACEITE MINERAL
Origen	Ester natural de plantas	Mezcla de hidrocarburos
Biodegradable	Rápido	Lento
Punto de inflamación	>350°C	170-180°C
Permitividad relativa	3,2	2,2
Rigidez dieléctrica	48 kV	30 kV
Calor específico	0,57 cal/gr/°C	0,43 cal/gr/°C
Conductividad térmica	0,17 W/mK	0,14 W/mK
Coefficiente de dilatación	$7,5 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$	$7,55 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$
Viscosidad (40°C)	42 mm ² /s	10 mm ² /s

Tabla 5.1: Características de los aceites. Tomada de [15] y [16].

La diferencia principal está en su origen que define el resto de propiedades. El aceite vegetal tiene un origen vegetal mientras que el mineral procede de hidrocarburos y por ello es mucho más contaminante y menos biodegradable. El aceite mineral no solo contamina en caso de vertido, también contaminan los gases que se producen en caso de arco eléctrico. Estas son una de las mayores ventajas que se buscan cuando se usa el aceite vegetal.

Otra ventaja clara del aceite vegetal es que tiene un punto de inflamación mucho mayor (el doble aproximadamente), reduciendo altamente el riesgo de incendio en

caso de fallo interno. Esto reduce los costes de una subestación al necesitar menor seguridad frente a incendios.

Como desventaja, el aceite vegetal evacúa peor que el aceite mineral el calor por tener una viscosidad mayor, a pesar de tener también mayor calor específico.

El aceite vegetal tiene una mayor afinidad con el agua que como ya se ha explicado es una gran ventaja que tiene frente al aceite mineral, aunque pueda parecer una desventaja inicialmente.

5.2 Medidas obtenidas en aceite mineral.

En este apartado se compararán los datos de humedad en porcentaje y partes por millón obtenidos en las medidas con aceite vegetal y mineral.

MEDIDAS	HUMEDAD EN EL ACEITE ANTES DE MEDIR (ppm)	HUMEDAD EN EL ACEITE DESPUÉS DE MEDIR (ppm)	HUMEDAD EN EL PAPEL (%)
Humedad 1%, medida 1	13,6	13,8	1,31
Humedad 1%, medida 2	13,8	13,9	0,83
Humedad 2%, medida 1	13,1	13,7	2,3
Humedad 2%, medida 2	13,5	13,4	2,4
Humedad 3%, medida 1	14	13,9	3,4
Humedad 3%, medida 2	13,5	13,6	3,2
Humedad 4%, medida 1	13,9	14,2	4,4
Humedad 4%, medida 2	14	13,7	4,3
Humedad 5%, medida 1	14,2	14,1	5,0
Humedad 5%, medida 2	13,9	14,1	5,44
Humedad 6%, medida 1	14	14,3	6,4
Humedad 6%, medida 2	13,7	14,1	6,4

Tabla 5.2: Humedad de las muestras y el aceite mineral. Tomada de [14].

Esta tabla demuestra que el aceite mineral es menos higroscópico que el vegetal ya que las cantidades de humedad en el aceite vegetal son mucho mayores que en el mineral.

En los siguientes apartados se compararán los resultados de la capacidad, pérdidas dieléctricas y tangente de delta de este estudio con los obtenidos con aceite mineral.

5.2.1 Capacidad.

En las siguientes figuras se muestran los resultados de capacidad en función de la frecuencia obtenidos en ambos aceites:

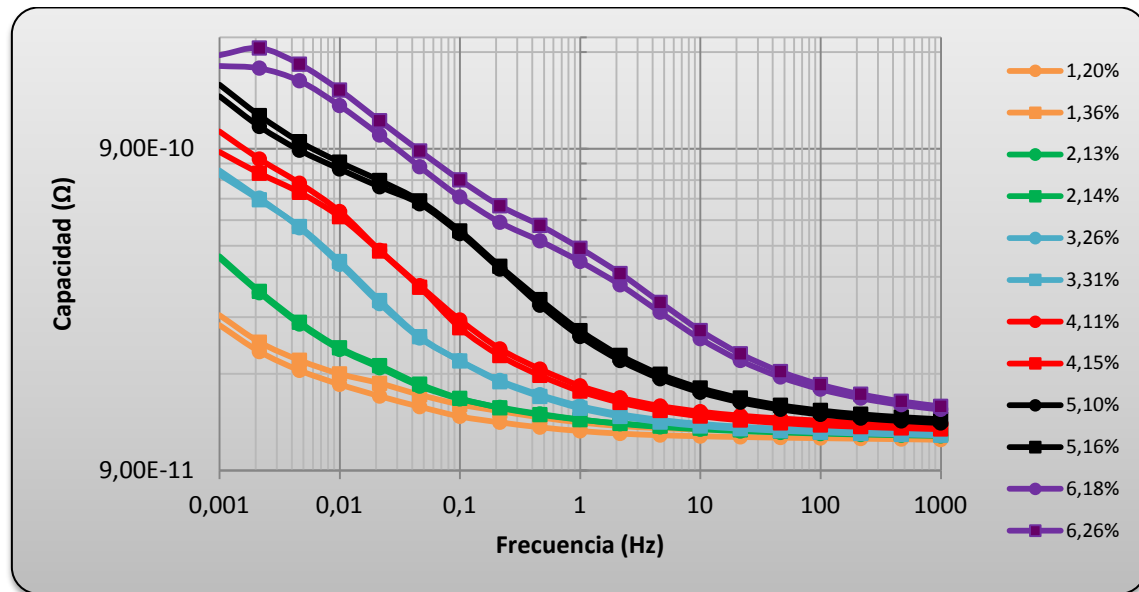


Figura 5.1: Gráfica con los resultados de la capacidad en el aceite vegetal.

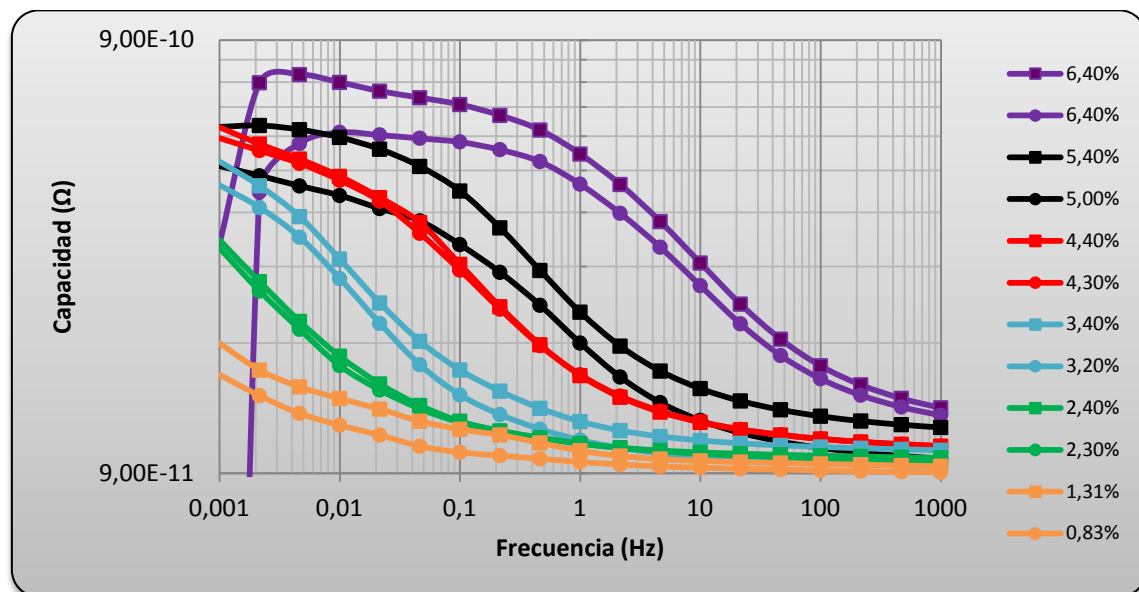


Figura 5.2: Gráfica con las curvas de la capacidad en aceite mineral. Tomada de [14].

La primera conclusión que se observa de ambas gráficas es que la capacidad a una frecuencia determinada es mayor en las muestras de mayor de humedad. También se observa que la tendencia de la capacidad en todas las curvas es aumentar al bajar la frecuencia, aunque la pendiente varía. La capacidad de las distintas muestras aumenta de forma más rápida cuanto mayor es su contenido en humedad.

Comparando los resultados entre aceites, se observa que las curvas obtenidas en aceite mineral tienen un cambio brusco de pendiente a frecuencia 10 Hz aproximadamente que se mantiene hasta 0,1 Hz que vuelve a tener una pendiente similar a la de la primera zona. Sin embargo, las curvas obtenidas en aceite vegetal aumentan de una forma más uniforme.

Al comparar las curvas de la capacidad en ambos aceites se demuestra que influye de manera notoria en la tendencia el tipo de aceite empleado en las medidas.

Para observar las conclusiones anteriores con mayor claridad se han representado en la siguiente gráfica las curvas de 1% y 4% de humedad de ambos aceites:

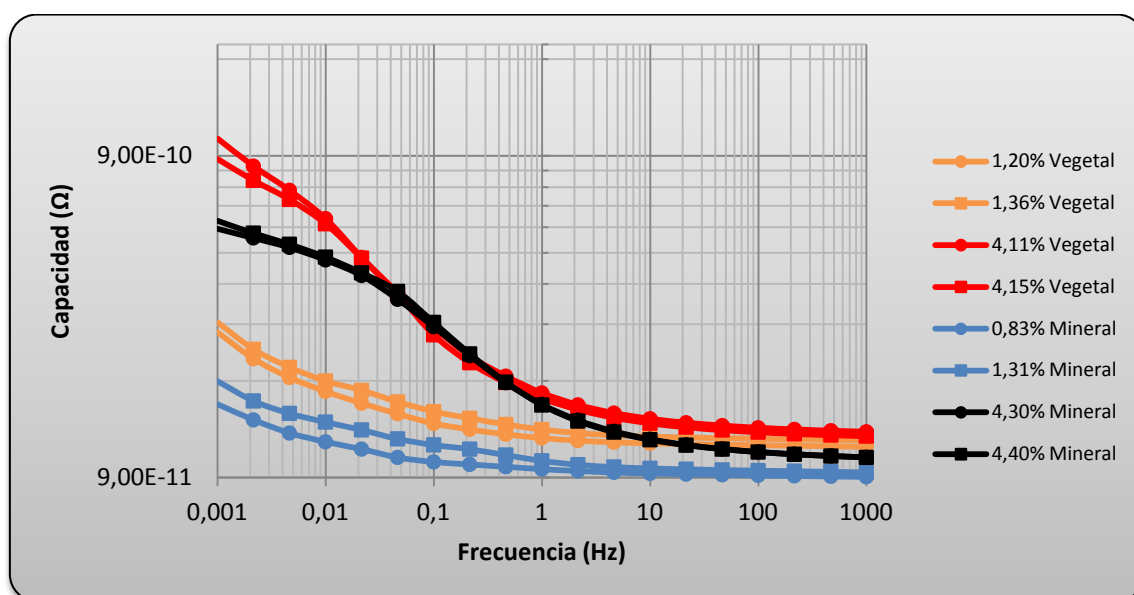


Figura 5.3: Gráfica con los resultados de la capacidad en aceite vegetal y mineral. Curvas de 1% y 4% de humedad.

Se han elegido las muestras de 1% y 4% por ser representativas, las del 1% de un transformador con un bajo contenido de humedad y las del 4% por serlo de un transformador con un contenido alto de humedad.

Al observar las curvas de cada porcentaje de humedad se demuestra que, como es lógico debido a que el aceite vegetal es más higroscópico, las muestras sumergidas en aceite vegetal presentan una capacidad mayor.

5.2.2 Pérdidas dieléctricas.

A continuación se comparan los resultados de las pérdidas dieléctricas, mostrando previamente las curvas en función de la frecuencia:

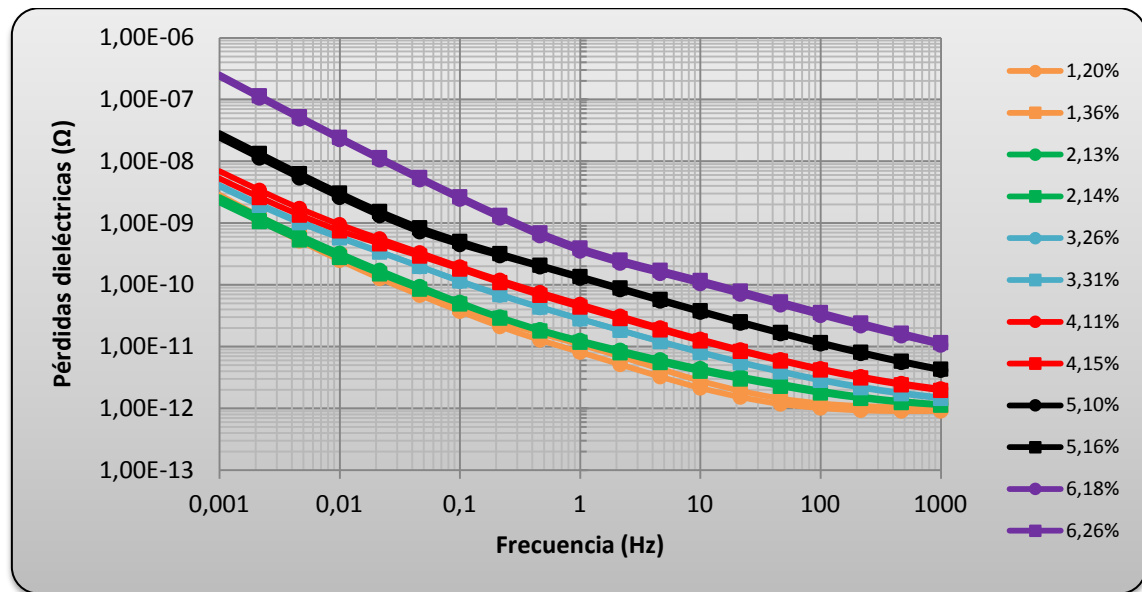


Figura 5.4: Gráfica con los resultados de las pérdidas dieléctricas en el aceite vegetal.

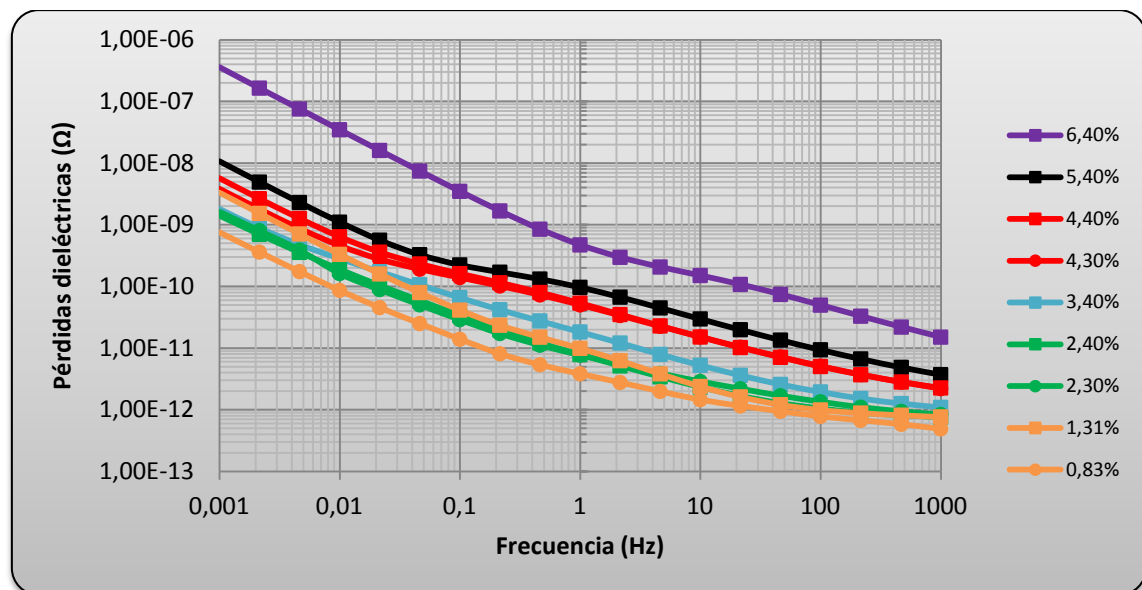


Figura 5.5: Gráfica con los resultados de las pérdidas dieléctricas en el aceite mineral. Tomada de [14].

Al comparar las dos gráficas se observa que la tendencia de las curvas no cambia al cambiar el tipo de aceite. También son muy similares las curvas al comparar humedades semejantes y las pequeñas diferencias se deben a que no tienen porcentajes de humedad exactos.

Se observa también que, para los dos aceites, las pérdidas dieléctricas aumentan mucho para las muestras con porcentajes de humedad del 6%.

En la siguiente gráfica se observa con más detalle la comparación entre las curvas de 1% y 4% de humedad de ambos aceites:

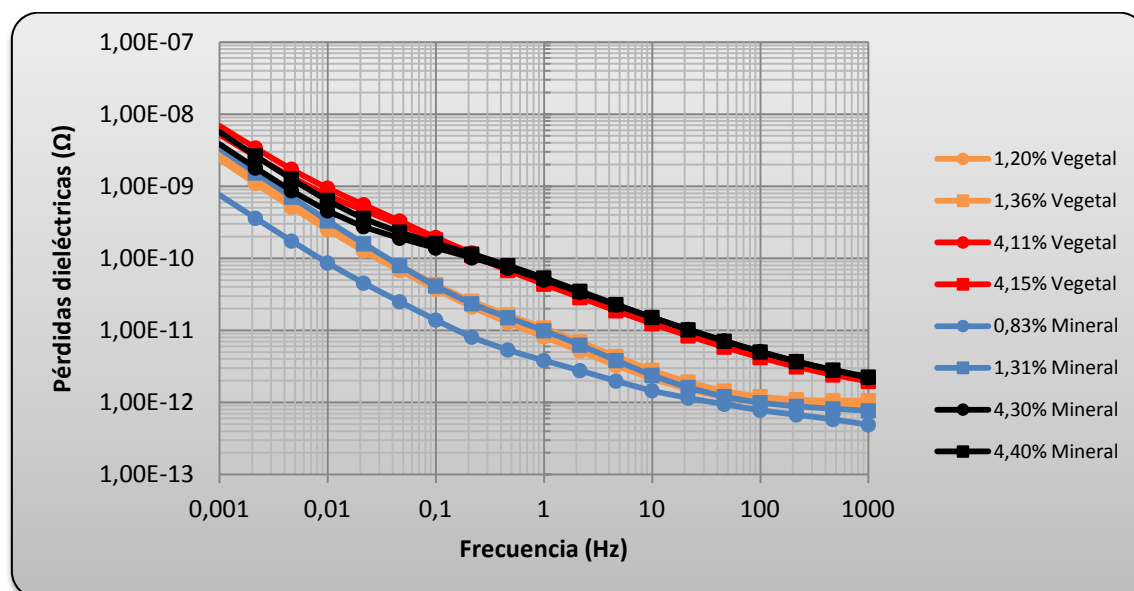


Figura 5.6: Gráfica con los resultados de las pérdidas dieléctricas en aceite vegetal y mineral. Curvas de 1% y 4% de humedad.

Se observa que, para las pérdidas dieléctricas el aceite empleado no produce cambios significativos en los resultados de las medidas.

5.2.2.1 Ecuación de las curvas de pérdidas dieléctricas.

En este apartado hallaremos las ecuaciones matemáticas de las curvas de las pérdidas dieléctricas. Tomaremos el rango de frecuencias 0,001 - 10 Hz y las curvas con humedad entre 1% y 4% al igual que en el caso del aceite vegetal. Las curvas elegidas son las siguientes:

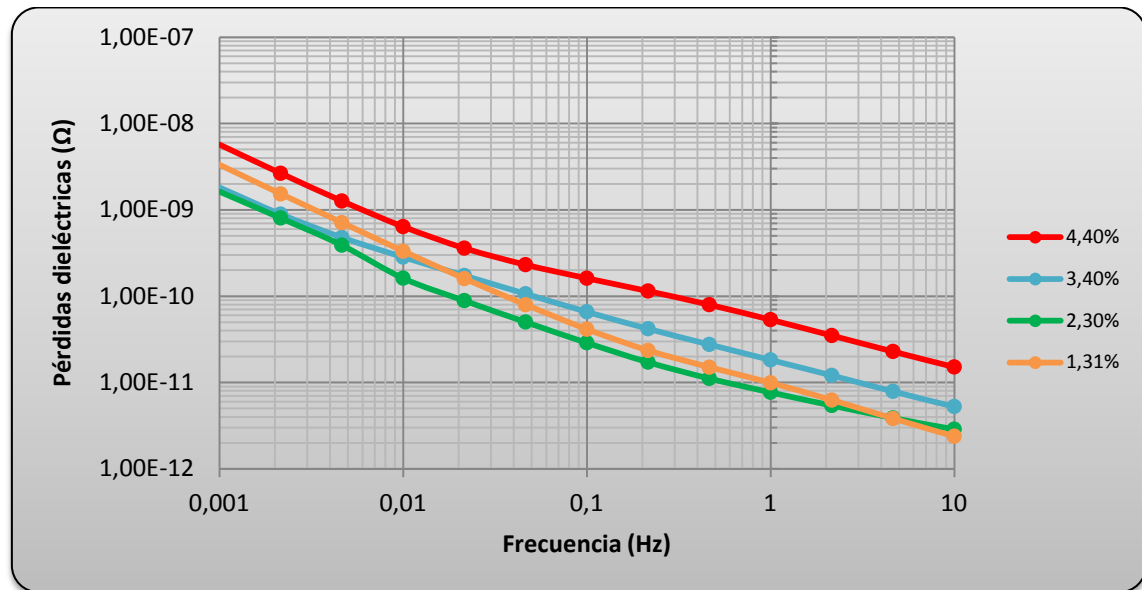


Figura 5.7: Pérdidas dieléctricas en el aceite vegetal. Curvas a caracterizar con su ecuación matemática.

En la gráfica siguiente se muestra la curva de 1,31% de humedad y su recta ajustada:

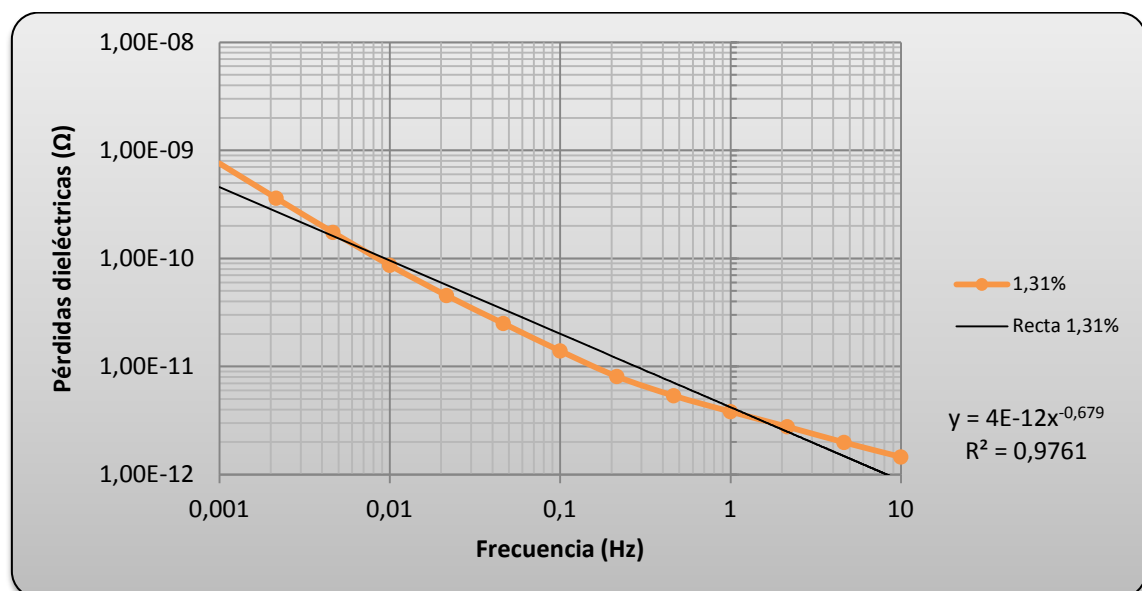


Figura 5.8: Curva de 1,31% de humedad para aceite mineral. Recta ajustada.

La ecuación y el coeficiente R^2 son:

$$P_d = 4 \cdot 10^{-12} \cdot f^{-0,679}$$

$$R^2 = 0,9761$$

En la siguiente gráfica se muestra la recta ajustada para la curva de 2,30% de humedad:

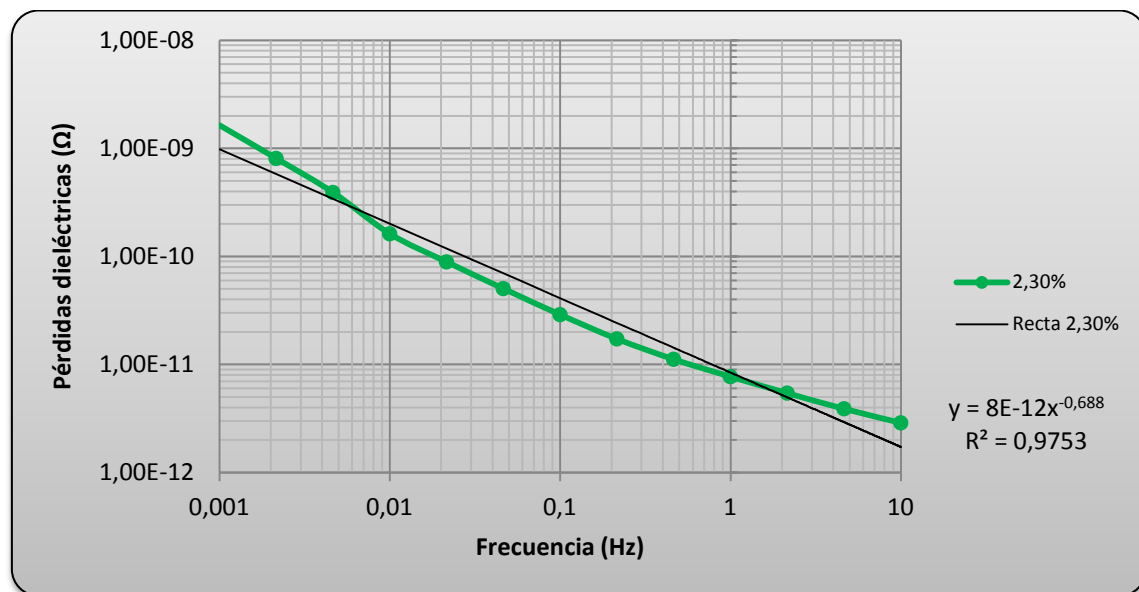


Figura 5.9: Curva de 2,30% de humedad para aceite mineral. Recta ajustada.

La ecuación y el coeficiente R^2 para la recta anterior son:

$$P_d = 8 \cdot 10^{-12} \cdot f^{-0,688}$$

$$R^2 = 0,9753$$

A continuación se muestra la recta ajustada para la curva de 3,40% de humedad:

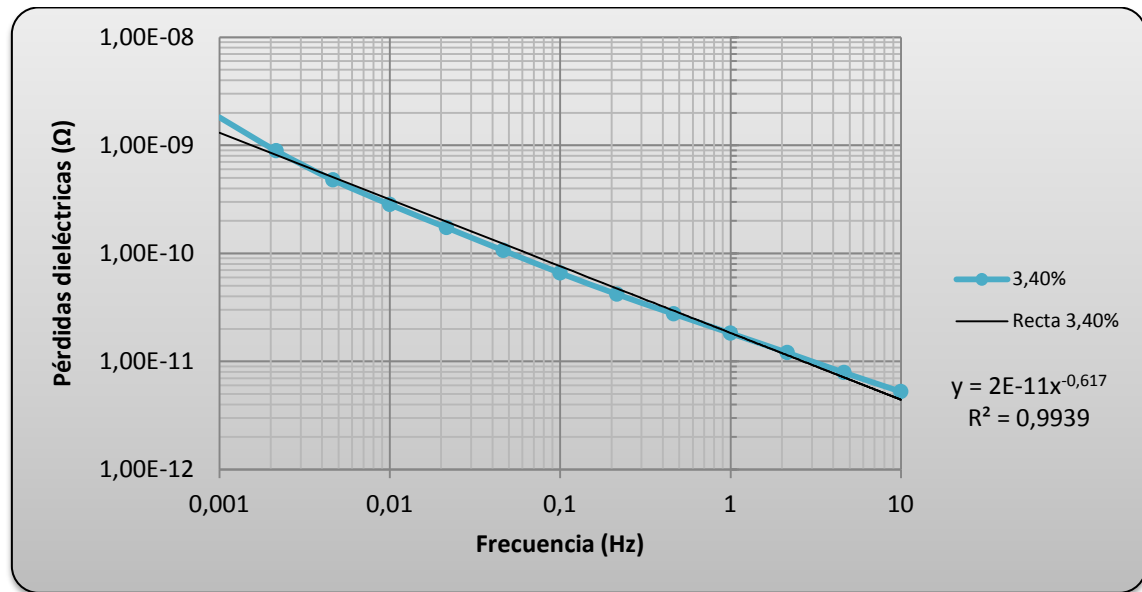


Figura 5.10: Curva de 3,40% de humedad para aceite mineral. Recta ajustada.

La ecuación y el coeficiente R^2 son:

$$P_d = 2 \cdot 10^{-11} \cdot f^{-0.617}$$

$$R^2 = 0.9939$$

Finalmente se muestra la curva de 4,40% de humedad con su recta ajustada:

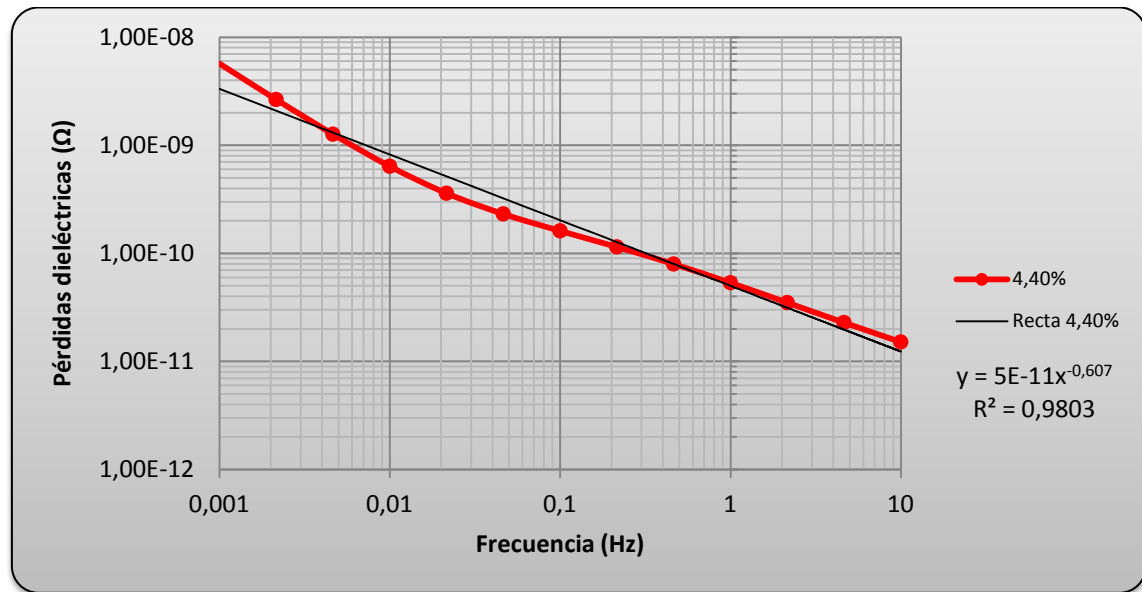


Figura 5.11: Curva de 4,40% de humedad para aceite mineral. Recta ajustada.

La ecuación y el coeficiente R^2 de este ajuste son:

$$P_d = 5 \cdot 10^{-11} \cdot f^{-0,607}$$

$$R^2 = 0,9803$$

Como resultado de estos ajustes podemos representar la curvar $h(H)$:

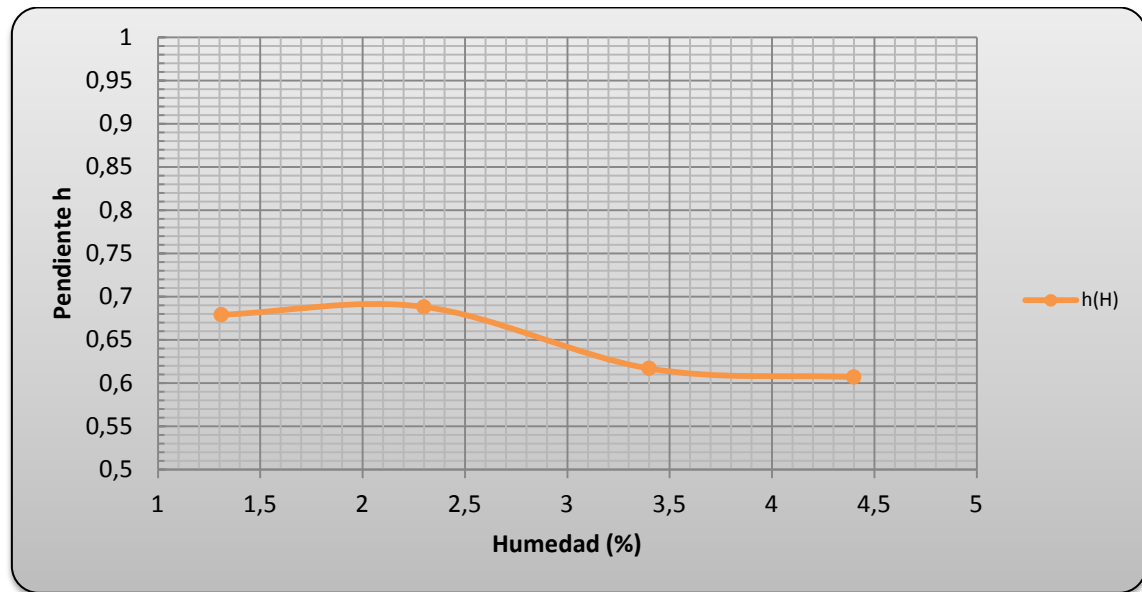


Figura 5.12: Gráfica de $h(H\%)$. Aceite mineral.

Se observa que no tiene la misma tendencia que la curva $h(H)$ de aceite vegetal. Este hecho puede ser debido a que las medidas obtenidas con el IDA 200 en aceite vegetal nos daban resultados más irregulares. Algunas curvas tienen tendencias cambiantes como se ha podido observar anteriormente.

5.2.3 Tangente de delta.

Finalmente se muestran y comparan los resultados obtenidos de la tangente de delta:

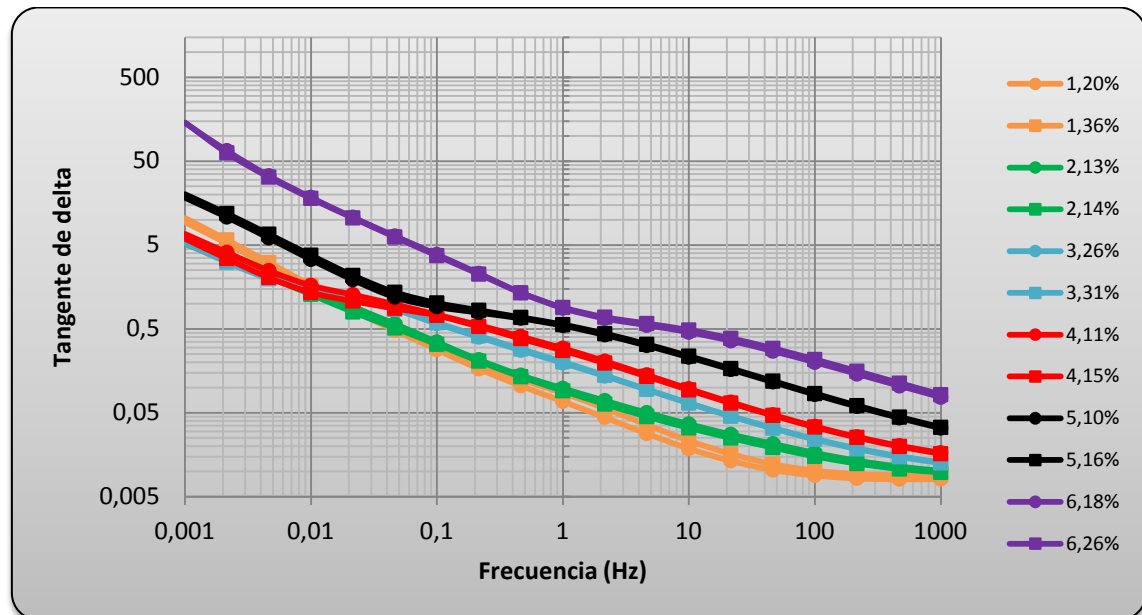


Figura 5.13: Gráfica con los resultados de la tangente de delta en el aceite vegetal.

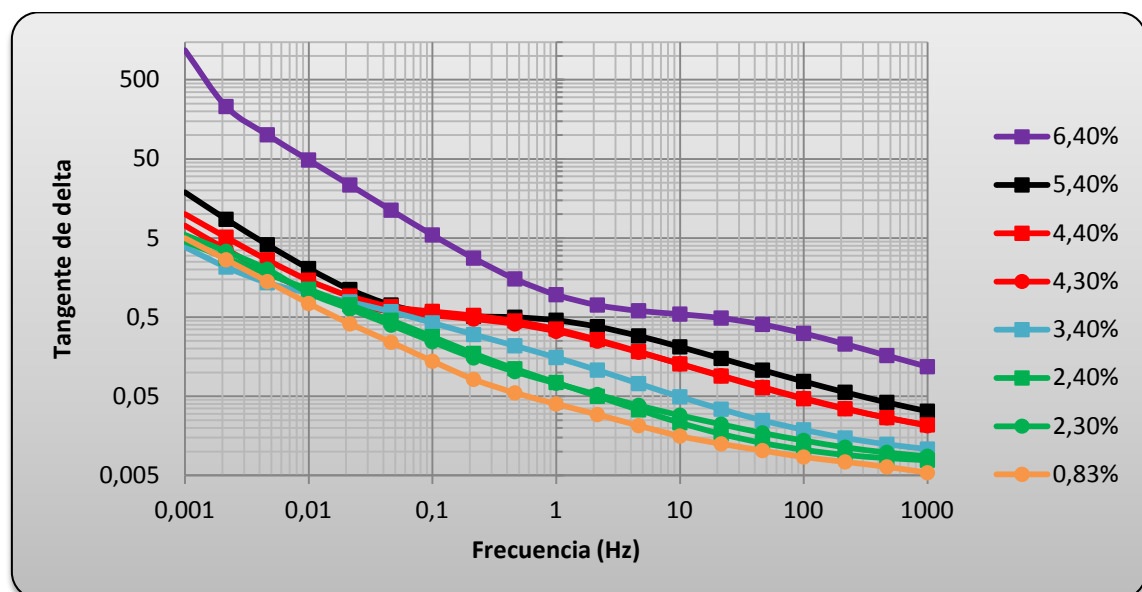


Figura 5.14: Gráfica con los resultados de la tangente de delta en el aceite mineral. Tomada de [14].

Con estos resultados se observa que la tendencia no cambia al cambiar de aceite. Las muestras de un mismo porcentaje de humedad toman valores similares a lo largo de todo el barrido de frecuencia. La tangente de delta toma valores bastante más elevados y crece más deprisa en las muestras de 6% de humedad.

En la siguiente gráfica se representan las curvas de 1% y 4% de humedad de ambos aceites para observar las comparaciones con mayor claridad:

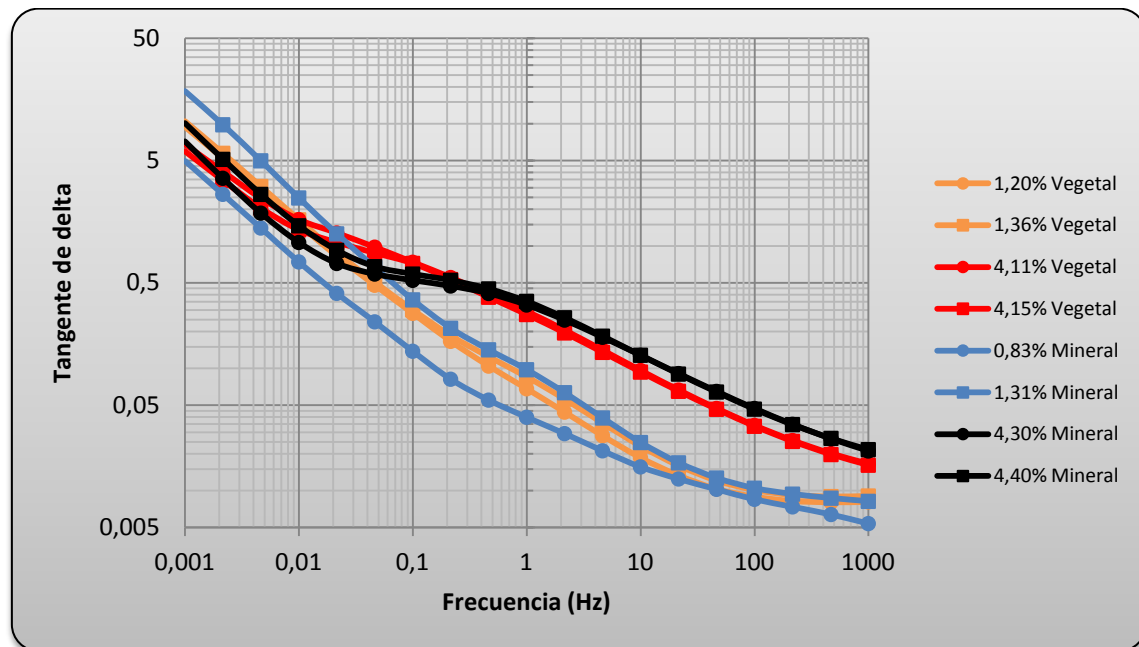


Figura 5.15: Gráfica con los resultados de la tangente de delta en aceite vegetal y mineral. Curvas de 1% y 4% de humedad.

En la zona de 0,01 – 0,1 Hz se produce la confluencia de las curvas haciendo que se crucen. Este rango de frecuencias es, por tanto, una zona de la que no se pueden sacar conclusiones del contenido de humedad de la muestra.

6. CONCLUSIONES.

El objetivo principal de esta investigación es conseguir un sensor que permita conocer en tiempo real la humedad del aislamiento sólido de un transformador para evitar fallos inesperados que provoquen serias consecuencias.

Para ello se ha diseñado un prototipo de sensor con el que se han calculado unos valores representativos de las pérdidas dieléctricas, la capacidad y la tangente de delta en un rango de frecuencias de 1 mHz a 1 kHz frente a la humedad para muestras con distintos porcentajes de humedad. Para medir se ha usado el método FDS.

El esquema de medida propuesto incorpora un electrodo de tipo malla que permite que se realice el intercambio de humedad entre el papel y el aceite que se produce de manera continua en un transformador real a causa de las variaciones de temperatura.

Las principales conclusiones que se sacan de este proyecto son:

- El sensor caracterizado es capaz de medir adecuadamente sobre muestras de aislamiento de transformadores con porcentajes de humedad entre 1% y 6%.
- Las características del papel estudiadas (capacidad, pérdidas dieléctricas y tangente de delta) aumentan al aumentar el contenido de humedad de la muestra y al disminuir la frecuencia.
- Los resultados obtenidos demuestran la utilidad de este método para analizar el estado de un transformador.
- En las medidas obtenidas se aprecia que el tipo de aceite empleado en el estudio afecta a los resultados de la capacidad de manera notoria. Las pérdidas dieléctricas y la tangente de delta no sufre cambios visibles.
- Los resultados son más uniformes en el caso de tener aceite vegetal.
- Con el objetivo de este proyecto cumplido, se puede seguir la línea de investigación y conseguir implantar el sensor con éxito en un transformador de potencia real.

7. ANEXO: PRESUPUESTO DEL PROYECTO.

En este anexo realizaremos una estimación del presupuesto de esta investigación y del número de horas que ha llevado hacer el proyecto. En la siguiente tabla se exponen las labores que se han llevado a cabo y su coste estimado:

DESCRIPCIÓN	UNIDADES/HORAS	COSTE/UD (€)	TOTAL (€)
Objeto de ensayo	26 ud	60	1560
Mano de obra (técnico del laboratorio)	26 h	13,34	346,67
COSTE TOTAL (€)			1906,67

Tabla 7.1: Presupuesto del proyecto.

En el coste total calculado se ha omitido el coste de los equipos empleados (IDA 200, Karl-Fischer y el horno) puesto que pertenecen al laboratorio de la Universidad y ya han sido usados en otros trabajos.

En la siguiente tabla se detallan las horas empleadas en cada labor de este proyecto:

TAREAS	HORAS
Laboratorio	100
Informes medidas iniciales	30
Configuración de medidas	16
Documento TFG	240
Defensa TFG	30
TOTAL	416

Tabla 7.2: Tiempo empleado en el proyecto.

El número de horas total que se ha necesitado para llevar a cabo este proyecto han sido 416 horas.

8. BIBLIOGRAFÍA.

[1] **Juan Carlos Burgos Díaz**; Apuntes de la asignatura “Circuitos magnéticos y transformadores”. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid.

[2] **Juan Manuel Martínez Tarifa**; Apuntes de la asignatura “Ingeniería de Alta Tensión”. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid.

[3] **Diego Fernando García Gómez**; “Determinación de coeficientes de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador”. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid. Mayo 2012.

[4] **Wikipedia**.

[5] **Pedro Reis Tenajas**; “Análisis del envejecimiento del aceite de un transformador mediante espectroscopia dieléctrica medida en baja frecuencia”. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid.

[6] **CHANDIMA EKANAYAKE**; “Diagnosis of moisture in transformer insulation”. Department of Materials and Manufacturing Technology. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden 2006.

[7] **CIGRÉ**; “Experiencias en diagnóstico de aislamientos aceite-papel con espectroscopia dieléctrica en el dominio de la frecuencia”. CIGRÉ A2-81. Marzo 2012.

[8] **CIGRÉ**; “Espectroscopia dieléctrica en el dominio de la frecuencia como herramienta de diagnóstico del aceite dieléctrico”. CIGRÉ A2-19. Mayo 2009.

[9] **Unión Fenosa**; “Mantenimiento integral de transformadores de potencia”. Marzo 1998.

[10] **Hao, J.; Liao, R.; Ma, Z.; Yang, L.**; “Influence of natural ester on frequency dielectric response of impregnated insulation pressboard”. IET Journals & Magazines. 2012.

[11] **Shareghi, M.; Phung, B. T.; Naderi, M.S.; Blackburn, T.R.**; “Dielectric response of transformer insulation oils”. IPEC, Conference on Power & Energy. 2012.

[12] IDA 200 User's Manual.

[13] Belén García, Guillermo Robles, Diego Fernando García; “Moisture sensor to characterize transformer solid insulations in transformers under non-equilibrium conditions”. 11th IEEE ISCD (International Conference on Solid Dielectrics), Bologna (Italy), July 2013.

[14] Daniel Santiago Sanz; “Desarrollo de un sensor para la determinación de la humedad del aislamiento sólido de un transformador”. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid. Octubre 2013.

[15] ABB; BIOTEMP – ABB sensible solution. The superior biodegradable, high fire point dielectric insulating fluid. 2010.

[16] NYNAS; Propiedades del aceite mineral Nytro Taurus. Diciembre 2012.